Article

원자력 발전소의 온배수 배출량 변화에 따른 대형저서동물 군집의 공간 변화

유옥환^{1*} · 이형곤¹ · 이재학¹ · 김경태² · 명철수³ · 문형태⁴ · 변주영⁴

¹한국해양과학기술원 해양생태계연구부

²한국해양과학기술원 해양환경보전연구부
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

³(주)에코션

(406-840) 인천광역시 연수구 갯벌로 129

⁴한국수력원자력(주) 환경관리팀
(135-881) 서울특별시 강남구 영동대로 520

Spatial Variation in Macrobenthic Communities Affected by the Thermal Discharge Volumes of a Nuclear Power Plant on the East Coast of Korea

Ok Hwan Yu^{1*}, Hyung-Gon Lee¹, Jae-Hac Lee¹, Kyung-Tae Kim², Cheol-Soo Myung³,
Hyung Tae Moon⁴, and Ju Young Byun⁴

¹Marine Ecosystem Research Division, KIOST

²Marine Environments & Conservation Research Division, KIOST
Ansan 426-744, Korea

³ECOCEAN Co., Ltd.

Incheon 406-840, Korea

⁴Environmental Management, Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd.
Seoul 153-881, Korea

Abstract: This study analyzed the species composition and density of a macrobenthic community according to variations in the thermal discharge volumes of a nuclear power plant before, during, and after the shutdown of the nuclear power plant during two periods. In this study, 369 macrobenthic fauna species were collected, and their mean density was 1,712 ind. m⁻². The number of species and diversity of macrobenthic fauna decreased with distance from the thermal discharge area, regardless of whether the nuclear plant shutdown or not. Many macrobenthic taxa appeared near the thermal discharge area, but polychaetes species were more prominent in outer areas than at the discharge area. The density of macrobenthic fauna decreased with distance from the thermal discharge area during a plant shutdown in the fall of 2011, but increased, except at two sites, near the discharge area in the winter of 2012. Cluster analysis indicated that the spatial distribution of the macrobenthic community changed in areas near the nuclear power plant after a shutdown period; that is, the station group I, in areas near the nuclear power plant, became narrower after the shutdown, but it recovered to previously occupied areas after the nuclear power

*Corresponding author. E-mail : ohyu@kiost.ac

plant began operating again. Opportunistic species, such as the polychaetes *Lumbrineris longifolia* (= *Scoletoma longifolia*) and *Mediomastus californiensis*, which were present in high densities near thermal discharge areas, decreased after the shutdown but recovered after the plant re-opened. The number of species and diversity of the macrofauna and the density of dominant species showed a significant correlation with temperature, except in winter periods. The results of this study revealed that changes in the amount of thermal discharge before and after the shutdown of a nuclear power plant could exert an influence on the structure of macrobenthic community within the thermal discharge areas depending on the season.

Key words : thermal discharge, nuclear power plant, macrobenthos, East Sea

1. 서 론

산업화 발달과 전력 수요의 증가에 따라 연안에 건설되는 많은 발전소들은 해수를 냉각수로 이용한 후, 온배수를 바다로 방출하고 있다. 이와 같은 인위적인 수온 상승은 발전소 주변 해수의 온도를 증가시키는데 중요한 역할을 하고 있다(Kolflat 1968). 지금까지 발전소에서 방출되는 온배수가 해양생물에 미치는 영향에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며, 해양생물들은 수온 증가에 따라 생리적 또는 물리/화학적 교란을 받고 있는 것으로 알려지고 있다(McIennan and Miller 1990; Smythe and Sawyko 2000; Shiah et al. 2006; Bedulina et al. 2010; Teixeira et al. 2012). 발전소는 주기적으로 예방정비를 실시하기 위하여 일시적으로 발전을 중지하며, 그로 인해 온배수 방출량이 급격히 감소하여 발전소 주변 해역의 수온은 낮아진다. 짧은 기간 동안의 수온 변화는 주변 해양생물의 생리 반응에 영향을 주는 것으로 알려지고 있으나(Pilati 1976; Burton et al. 1979; Schneider 1981; Smythe and Sawyko 2000), 해양 저서생태계 군집구조에 미치는 영향 연구는 거의 없다.

연성기질 해역에 서식하는 대형저서동물의 분포는 퇴적상, 수심, 수온, 용존산소 등의 물리화학적 환경요인과 공간 혹은 종내 경쟁, 먹이원 등의 생물학적 요인의 영향을 받고 있다(Gray 1981). 물리화학적 요인 가운데, 퇴적물의 입도는 대형저서동물의 공간 분포를 결정하는데 중요한 제한 요인으로 알려져 있다(Buchanan et al. 1978; Weston 1988; Hoey et al. 2004). 또한 동일한 퇴적 환경에 서식하는 대형저서동물의 분포는 계절적인 수온의 변화 및 먹이원의 차이에 따라 영향을 받는다(Rossi et al. 2001; Weissberger et al. 2008). 반면에, 우리나라 동해 연안에 서식하는 대형저서동물의 공간 분포는 해안선에서 멀어질수록 수심이 증가하여 수온이 감소하기 때문에, 퇴적물의 입도뿐만 아니라 수심의 영향을 크게 받는다(유 등 2011). 특히, 동해안에 설치된 발전소 주변 해역에 서식하는 대형저서동물의 공간 분포는 일차적으로 수심의 영향을 받으며, 이차적으로 퇴적환경의 영향을 받는다.

온배수의 영향을 지속적으로 받는 지역의 대형저서동물 중 다양도는 여름철과 겨울철에 감소하며(Snoeijis and Prentice 1989), 여름철 퇴적물의 온도가 높을 경우 대량 사망이 나타나기도 한다(Suresh et al. 1993). 연안에 설치된 발전소들은 주기적인 예방정비를 위하여 일시적으로 발전을 중지하며, 그로 인해 온배수의 배출량이 감소하여 발전소 주변 해역의 수온이 낮아진다. 이와 같이 주기적으로 반복되어지는 온배수 배출량의 변화, 생물종, 계절 등의 다양한 환경 변화는 발전소 주변 해양생태계에 영향을 줄 것으로 여겨진다. 온배수의 수온 증가에 따른 대형저서동물의 종 조성 및 군집구조에 대한 연구가 실시된 바 있으나(Crema and Pagliai 1980; Bamber and Spencer 1984; Bamber 1990; Lardicci et al. 1999; Riera et al. 2011), 일시적인 온배수 중단에 따른 대형저서동물의 종 조성 및 군집에 미치는 영향 연구는 거의 없다.

그러므로 본 연구에서는 발전소 일시정지 이후, 온배수의 배출 감소에 따른 환경 변화가 대형저서동물의 종 조성 및 군집구조에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

생물 채집

원자력발전소 일시 정지에 따른 대형저서동물의 종 조성 및 군집구조의 영향을 파악하기 위하여 2011년부터 2012년까지 고리원자력발전소 2호기 배수구 앞 정점을 포함한 주변 11개 정점에서 채집을 실시하였다(Fig. 1). 대형저서동물 조사는 2011년의 경우, 고리원자력발전소 4호기 예방 정비 기간 중(9월)과 재가동 후(10월)에 실시하였다. 2012년의 경우, 2호기 예방 정비 기간 전(2월)과 정지 중(4월) 그리고 재가동 후(5월)에 조사를 실시하였다(Table 1). 2012년 조사 기간 동안 고리원자력발전소 1호기가 예방정비(2012.2.4.~2012.3.4.)와 응급정지(2012.3.13~2012.8.10.)로 발전이 정지되었다.

대형저서동물 시료 채집은 각 정점에서 Smith-McIntyre 그랩(0.1 m²)을 이용하여 2회 실시하였고, 현장에서 망목 1 mm 채에 걸러진 퇴적물(생물 포함)을 10% 중성 포르말

Fig. 1. Map of the study area showing the sampling sites for benthic macrofauna

Table 1. Sampling dates and the volumes of thermal discharge before, during and after shutdown for the regular maintenance of the Gori nuclear power plant

Sampling date	Number of sampling sites	Volumes of thermal discharge (m^3s^{-1})	Bottom temperature at discharge area	Shutdown periods for regular maintenance
3 August, 2011*	16*	200.5	16.1	
28 September, 2011	11	141.0	22.1	17 Sep. ~ 9 Oct. 2011 for Gori reactor 4
18 October, 2011	11	200.5	18.7	
23 February, 2012	11	161.7	13.1	4 Feb. ~ 4 Mar. 2012 for Gori reactor 1
6 April, 2012	11	119.0	12.1	7 Mar. ~ 25 Apr. 2012 for Gori reactor 2
10 May, 2012	11	161.7	14.9	13 Mar. ~ 10 Aug. 2012 for Gori reactor 1**

*data from KEPRI (2012), **emergency maintenance shutdown

린으로 고정하였다. 고정된 퇴적물은 실험실로 운반하여 각 분류군별 대형저서동물을 분별 채집한 후, 개체수와 습중량을 측정하였다. 각 분류군별 대형저서동물은 현미경을 이용하여 가능한 중 수준까지 동정하였으며, 출현 개체수를 계수하였다.

환경 요인

조사 기간 동안 조사 지역 수층의 수온, 염분, pH, 용존 산소 등의 환경요인 분석을 위치하여, 현장에서 YSI 6600을 이용하여 측정하였다. 퇴적 환경 요인 분석을 위하여 그래프에 채집된 표층 퇴적물의 온도를 측정한 후, 퇴적물의 일부를 냉동 보관하였다. 냉동 보관된 퇴적물은 실험실에

서 퇴적물 입도분석과 퇴적물 내의 총유기탄소(TOC) 등을 분석하였다. 입도분석은 채취된 시료 중 5.0 g을 비이커에 담아 10.0%의 H_2O_2 로 유기물과 0.1 N-HCl로 탄산염을 제거한 후, 시료를 4.0 ϕ 체로 조립질과 세립질로 구분하여 4 ϕ 이하의 사질 시료는 Ro-tap sieve shaker로 15분간 체질한 후 입도 등급별로 무게 백분율을 구하였고, 4.0 ϕ 이상의 니질 시료 2.0 g를 0.1% calgon 용액을 넣고 교반시킨 후 X-선 자동입도 분석기인 Sedigraph 5000D를 이용하여 입도무게 백분율을 Inclusive Graphic Method에 의하여 변수를 구하였다. 퇴적물의 총유기탄소량은 50°C에서 48시간 건조시킨 다음 1 g씩 채취하여 0.1 N 염산으로 탄산염을 제거한 후 CHN 분석기를 통해 구하였다.

자료 분석

대형저서동물의 단변량 분석을 위해 조사 시기 또는 정점 별 출현 동물 분류군별 구성비, 종조성, 서식밀도, 생체량, 우점종 등의 분포 특성을 분석하였다. 2011년의 경우, 4호기 중단 전인 8월에 대한 수층 환경 및 대형저서동물 군집구조 자료는 발전소에서 수행한 모니터링 조사 자료를 사용하였다(KEPRI 2012). 대형저서동물의 개체수와 습중량은 단위면적당(m^2) 자료로 환산하여 사용하였다. 또한 사용된 생태학적 지수로는 Shannon and Weaver (1963)의 종 다양성 지수(Diversity index, H')와 Simpson의 균등도 지수(Evenness, J') 등을 통하여 분석하였다. 대형저서동물의 다변량 분석을 위해 우선 정점별 종조성과 그에 따른 그룹별 유사도 분석을 통한 집괴분석과 MDS (non-metric multi-dimensional scaling) 분석을 실시하였다 (Clarke and Warwick 2001). 일부종의 높은 개체수 출현이 유사도 분석에 미치는 영향을 감소시키기 위하여 정점별 총 출현 개체수를 4th root transformation하여 Bray-Curtis의 유사도 지수를 이용하였다(Somerfield 2008). 구분된 군집의 유의성 검증을 위해 SIMPROF(similarity profile premutation test) 분석은 집괴분석을 실시할 때 동시에 실시하였다. 각 구분된 군집의 유사도에 기여한 기여종을 밝

히기 위해 SIMPER(Similarity-percentages procedure) test를 실시하였다(Primer 6.0, Primer-E Ltd.). 저서동물의 공간 분포에 영향을 미치는 환경요인을 파악하기 위해 BIO-ENV(Biota-environment matching using step algorithm) test를 실시하였다. 또한 환경 변수와 생물지수(종수, 밀도, 종 다양도 등), 그리고 우점종 간의 상관관계를 파악하기 위해 Spearman rank correlation을 실시하였다(SigmaStat 3.1).

3. 결 과

환경 요인

조사 정점간의 수심은 대부분 30 m 이내에 위치하였으며, 두 정점(E3 정점, N4 정점)은 50 m 수심대에 위치하였다(Fig. 1). 고리 원전 주변 조하대 정점에서 퇴적물의 입도 분포는 2.47-9.39 ϕ 사이였으며, 평균 입도는 7.4 ϕ 였다(Fig. 2). 퇴적물의 입도는 정점별 유의한 차이를 보였으나(ANOVA $F = 8.05$, $p < 0.001$), 시기 별 유의한 차이는 나타나지 않았다(ANOVA, $F = 1.84$, $p > 0.05$). 발전소 배수구와 취수구에서의 퇴적물 평균 입도는 각각 4.44 ϕ 와 4.61 ϕ 로 조립한 자갈이 약간 포함된 펄모래 퇴적상을 보

Fig. 2. Mean grain size (ϕ), bottom temperature ($^{\circ}C$), total organic carbon (%), and salinity (ppt) of each sampling site

였으나, 그 이외의 정점에서는 6 σ 이상으로 니질 특징을 보였다. 발전소 배수구 근처에서의 퇴적물은 시기별로 모래와 자갈 함량 차이가 나타나는 경향을 보였으며, 취수구 근처 정점에서는 2013년 2월 조사 시 모래의 함량이 거의 나타나지 않는 특징을 보였다(Fig. 2). 조사 기간 동안 퇴적물에 존재하는 총유기탄소의 양은 0.37-8.6% 범위로, 평균 2.33%를 보였다. 총유기탄소의 양은 조사 정점 별 (ANOVA, $F=8.40$, $p<0.001$), 시기 별 (ANOVA, $F=8.31$, $p<0.001$)로 유의한 차이를 보였다. 발전소 배수구 근처 정점에서 퇴적물의 총유기탄소량이 평균 6.67%로 가장 높았으며, 발전소에서 멀어질수록 감소하였다(Fig. 2). 저층의 평균 수온은 2011년 9월과 10월에 각각 17.2°C와 14.5°C로 발전소 중단 후 재가동 영향보다는 계절적인 영향을 보였다(Fig. 2). 반면에, 2012년의 경우, 1호기만 중단된 이후 2호기 발전 중단 전 2월의 평균 수온은 12.6°C였으나, 1호기와 2호기 모두 중단된 4월의 경우, 11.7°C로 감소하였다. 그러나 5월에는 계절적인 변화와 발전소 2호기 재가동으로 평균 수온은 13.7°C로 증가하였다. 각 시기별, 수심 30 m 이내의 정점 간의 수온 분포는 배수구 앞에 위치한 정점에서 가장 높았으며, 배수구에서 멀어질수록 감소하였다. 발전소 배수구 인근 3 km 내의 낮은 수심에 위치한 정점들 가운데, 취수구에 인접한 N1 정점보다는 배수구 동쪽과 남쪽에 위치한 E1, S1, S2 정점에서 상대적으로 수온이 높았다. 저층 염분 분포는 전 기간 동안, 33.9에서 34.0 ppt 분포를 보였으며, 2011년 9월과 10월에는 배수구 앞과 남쪽에 위치한 정점에서 상대적으로 낮았다(Fig. 2).

종 조성

2011년부터 2012년 동안 고리 원전 주변 조하대에서 채집된 대형저서동물의 총 출현 종수는 369종이었으며, 환형동물이 155종(42.0%)으로 가장 많았으며, 갑각류와 연체동물이 각각 82종(22.2%) 순으로 나타났다. 대형저서동물의 평균 서식밀도는 1,712개체/m²이었다. 주요 분류군 가운데 환형동물의 개체수가 1,050개체/m²(61.3%)로 가장 높았으며, 연체동물(277개체/m², 16.2%), 갑각류(155개체/m², 9.0%) 순으로 감소하였다. 대형저서동물의 평균 생체량은 135 g/m²였다. 분류군별 생물량은 극피동물이 35.3% (50.08 g/m²)로 가장 높았으며, 연체동물(34.2%, 48.4 g/m²), 환형동물(19.5%, 27.6 g/m²), 갑각류(2.4%, 3.4 g/m²) 순으로 감소하였다.

조사 기간 동안 정점별 출현한 대형저서동물의 종수는 발전소 취수구에서 가까운 정점에서 높았고, 배수구에서 멀어질수록 감소하는 경향을 보였다(Fig. 3). 2011년 고리 4호기 발전 정지 중인 9월의 경우, 발전소 취수구 북쪽에 위치한 N3 정점에서 114종으로 가장 높았으며, N1

정점, E1 정점, 배수구 앞인 D1 정점 순으로 감소하였다. 또한 가장 북쪽에 위치한 N4 정점에서는 6종만 출현하였다. 고리 4호기가 재가동 중인 10월의 경우, 발전소 취수구 근처인 N1 정점에서 출현 종수가 높았다. 배수구 앞인 D1 정점에서는 발전 정지 기간 중인 9월과 출현 종수의 차이가 없었다. 발전소에서 북쪽으로 위치한 N 정점들의 대형저서동물 종수는 발전 정지 중인 9월에 비해 낮았으나 발전소에서 동쪽과 남쪽으로 위치한 정점에서는 종수의 감소가 크지 않았다. 2012년 고리 2호기 발전 정지 전(2월)의 정점별 대형저서동물의 종수는 발전소 남쪽에 위치한 S1 정점에서 66종이 출현하여 가장 높았으며, N1 정점, N2 정점 순으로 감소하였다(Fig. 3). 발전소 배수구 근처에 위치한 D1 정점과 E1 정점에서는 각각 39종과 35종이 출현하여, 인근 정점에 비해 상대적으로 낮았다. 발전 정지 중인 4월의 대형저서동물 종수는 E1 정점에서 71종으로 가장 높았으며, N1 정점, S1 정점 순으로 감소하였다. D1 정점에서 발전 정지 중 기간에 31종이 나타나, 발전 정지 전보다 감소하는 경향을 보였다. 발전 재가동 후, 대형저서동물의 종수는 발전소 취수구 근처에 위치한 S1 정점에서 55종으로 가장 높았으며, 배수구 인근 D1 정점에서는 정지 중인 기간과 출현 종수의 차이는 없었다.

2011년 정점별 대형저서동물의 출현 개체수는 발전소에서 가까운 정점에서 높았고, 발전소에서 멀어질수록 감소하는 경향을 보였다(Fig. 3). 반면에, 2012년 발전소 취수구 근처인 정점들에서는 일부 정점(N1 정점, 발전 정지 전; E1 정점, 정지 중)을 제외하고 개체수가 낮았다. 2011년 고리 4호기 발전 정지 기간인 9월의 경우, 발전소 취수구 근처에 위치한 N1 정점에서 7,580개체/m²로 가장 높았다. 배수구 인근 D1 정점에서는 발전 정지 기간 중 770개체/m²로 주변 지역에 비해 상대적으로 낮았으나, 재가동 이후 2,690개체/m²로 급격히 증가하였다. 그러나 발전소 동쪽과 남쪽에 위치한 정점들에서의 변화는 크지 않았다.

2012년 고리 2호기 발전 정지 전(2월)의 정점별 대형저서동물의 출현 개체수는 배수구 인근에 위치한 D1 정점과 E1정점에서 각각 800개체/m²와 425개체/m²로 매우 다른 정점에 비해 낮았다(Fig. 3). 배수구 앞에 위치한 D1 정점에서의 출현 개체수는 발전 정지 기간 동안 급격히 감소하였으나, 재가동 후에는 다시 증가하는 경향을 보였다. 그러나 발전소 북쪽에 위치한 N 정점들의 경우 변화의 폭이 2011년에 비해 크지 않았다. 반면에 동쪽에 위치한 정점에서 출현한 대형저서동물의 개체수는 발전 정지 전과 중인 기간에 2,000개체/m² 이상으로, 다른 정점에 비해 높았으며, 발전소에서 멀어질수록 증가하는 경향을 보였다. 발전소 남쪽에 위치한 S 정점들에서의 출현 개체수는 발전 정지 이전과 중 그리고 재가동 후 기간 동안 뚜렷

Fig. 3. Number of specie, density, diversity and biomass of macrofauna in 2011 (A) and 2012 (B)

한 차이를 보이지 않았다.

조사 기간 동안 각 정점 별 출현한 대형저서동물의 생체량은 2011년 발전 정지 중인 9월의 경우, S1 정점에서 가장 높았다(Fig. 3). 발전 정지 중 기간 동안 N4 정점에서 가장 낮았으며, 배수구 앞에 위치한 D1 정점에서도 주변 정점에 비해 상대적으로 낮았다. 발전 재가동 후인 10월의 경우, E3 정점에서 가장 높았고, 배수구 인근 D1 정점에서도 9월에 비해 증가하였다. 그러나 발전 정지 중 기간에 높았던 S1 정점, N2 정점, N3 정점에서는 감소하였다. 2012년 발전 정지 전인 2월의 경우, 발전소 배수구를 중심으로 멀어질수록 대형저서동물의 생체량은 증가하는 경향을 보였다. 남쪽에 위치한 S 정점들의 생체량은 평균 100 g/m^2 이상으로, 다른 정점에 비해 높았다. 배수구 인근 D1 정점에서의 생체량은 20.5 g/m^2 로 주변의 정점에 비해 낮았으며, 발전 정지 기간 동안인 4월에도 발전 정지 전보다 감소하였으나, 발전 재가동 후인 5월의 경우, 배수구 인근 D1 정점에서의 생체량은 정지 중 기간보다 6배 이상 증가하였다. 또한 주변에 위치한 E1 정점과 N1 정점에서도 발전 재가동 이후 정지 중인 기간에 비해 2배 이상 증가하였다.

조사 기간 동안 각 정점에서 출현한 대형저서동물의 종 다양도 지수는 평균 2.47이었으며, 조사 정점 별 종 다양도 지수의 변화는 발전소 배수구에서 멀어질수록 감소하는 경향을 보였다(Fig. 3). 각 조사 시기별 종 다양도 지수의 변화는 2011년 9월(발전 정지 중)에 10월(가동 중)로 갈수록 2.55에서 2.43으로 감소하였다. 또한 2012년 발전 정지 전인 2월과 정지 기간 중인 4월의 종 다양도 지수는 각각 2.62와 2.43을 보여, 정지 중 기간에 감소하였다. 그러나 발전 재가동 후에도 종 다양도 지수는 2.48로 증가하였다. 2011년 발전 정지 기간 동안 종 다양도 지수는 N3 정점에서 3.98로 가장 높았으며, D1정점에서 3.57, E1정점에서 3.24로 나타났다. 9월의 종 다양도 지수는 배수구에서 멀어질수록 감소하는 경향을 보였다. 반면에 발전 재가동 후인 10월 D1 정점에서의 종 다양도 지수는 2.65로 감소하였다. 발전 재가동 후, E1 정점에서 3.37로 가장 높았으며, N1 정점에서 3.23, S1 정점에서 2.78을 보여, D1 정점 주변에서 비교적 높은 종 다양도 값을 보였다. 2012년 발전 정지 전인 2월의 경우, D1 정점을 포함한 주변 정점(E1, N1, S1)에서 3 이상의 높은 종 다양도 값을 보였다. 이와 같은 경향은 발전 정지 중인 4월에도 비슷하게 나타났으며, 발전 재가동 후인 5월에도 비슷하였다.

우점종

2011년부터 2013년까지 고리 원전 주변의 조하대에서 출현한 개체수의 상위 5% 안에 포함된 종을 우점종으로 구분하였다(Table 2). 조사 기간 동안 가장 우점한 종은

다모류 *Magelona japonica*(양손갯지렁이)였으며, 평균 출현 개체수는 231 개체수/m^2 (13.5%)였다. 그 다음으로, 성구동물인 *Apionsoma misakiana* (132 개체수/m^2 , 7.7%), 이매패류 북방호두조개 *Ennucula tenuis* (114 개체수/m^2 , 6.7%), 다모류 긴자락송곳갯지렁이 *Lumbrineris longifolia* (= *Scoletoma longifolia*) (106 개체수/m^2 , 6.2%), 오뚜기갯지렁이 *Sternaspis scutata*(96 개체수/m^2 , 5.6%), 버들갯지렁이류 *Mediomastus californiensis*(92 개체수/m^2 , 5.4%), 단각류 나िका안경열새우 *Ampelisca naikaiensis*(89 개체수/m^2 , 5.2%) 순으로 우점하였다. 그 이외에 시기 별로, 다모류 *Spiophanes bombyx*(민얼굴갯지렁이), 이매패류인 *Raetella pulchella*(쇠개량조개), 극피동물 *Amphipholis* sp.(양비늘거미불가사리류), 다모류 *Heteromastus filiformis*(버들갯지렁이류) 등은 조사 시기 별로 우점하였다.

조사 기간 동안 우점종의 각 정점별 출현 경향을 보면, 2011년 발전 정지 중 9월에 최 우점종인 민얼굴갯지렁이(*S. bombyx*)는 N1 정점에서만 극 우점하였으며, 재가동 후인 10월에 N1 정점에서 급격히 감소하였다(Fig. 4). 양손갯지렁이(*M. japonica*)는 E2 정점과 S3 정점에서 주로 출현하였으며, E2 정점에서는 9월에서 10월로 갈수록 개체수가 감소하였지만, S3 정점에서는 증가하였다. 버들갯지렁이류인 *M. californiensis*는 발전소 배수구 주변 정점에서 출현하는 종이었으며, 발전 정지 중에서 발전 재가동 후로 갈수록 D1 정점과 S1 정점에서 개체수가 증가하였다. 그러나 E1 정점과 N1 정점에서는 감소하였다. 쇠개량조개(*R. pulchella*)는 D1 정점에서 매우 작게 출현하였으며, 남쪽에 위치한 S 정점들과 N 정점들에서 높게 출현하였다. 그러나 S1에서 S3로 갈수록 감소하였으며, 발전 정지 중에서 재가동 후로 갈수록 대부분의 정점에서 감소한 경향을 보였다. 양비늘거미불가사리류(*Amphipholis* sp.)는 D1 정점과 E1 정점에서 주로 출현하였으며, D1 정점에서는 9월에서 10월로 갈수록 증가한 반면, E1 정점에서는 감소하였다(Fig. 4).

2012년 발전 정지 전(2월)과 정지 기간(4월) 그리고 재가동 후(5월) 동안, 우점종의 정점별 출현 경향을 보면, 최 우점종인 양손갯지렁이(*M. japonica*)는 발전소 배수구 인근 정점에서는 거의 출현하지 않았으며, 발전소에서 멀어질수록 개체수는 증가하였다(Fig. 4). 성구동물인 *A. misakiana*는 N1 정점과 남쪽 S1, S2 정점에서 우점한 종으로, N1 정점에서는 발전 정지 기간 동안 감소하였다. 버들갯지렁이류인 *M. californiensis*는 D1 정점에서 거의 출현하지 않았으며, E1, E2, E3 정점에서 시기별 개체수는 증가하였다. 쇠개량조개(*R. pulchella*)는 D1 정점에서 발전 정지 전에는 출현하지 않았으나, 정지 중에 급격히 증가하였고, 발전 재가동 후에는 전혀 출현하지 않았다. 이와 같은 현상은 E1 정점에서도 비슷하였다.

Table 2. SIMPER analysis of macrobenthic fauna, listing the main characterising species at each group. Average abundance, and the % contribution to the similarity made by each characterising species is shown. Also listed is the cumulative percentage and the overall average similarity between replicate samples from within group

Species		A*	B*	%	Cumulative
		Average abundance	Average abundance	Contribution	%
Sep, 2011 dissimilarity: 71.8%	<i>Magelona japonica</i>	0.87	3.56	1.7	1.7
	<i>Sternaspis scutata</i>	0.56	3.05	1.51	3.21
	<i>Amphipholis</i> sp.	3.11	0.6	1.48	4.68
	<i>Chone teres</i>	2.36	0	1.35	6.03
	<i>Spiophanes bombyx</i>	2.4	0.36	1.3	7.33
	<i>Euclymene oerstedii</i>	2.96	0.69	1.29	8.63
Oct, 2011 dissimilarity: 71.2%	<i>Mediomastus californiensis</i>	4.32	1.17	2.33	2.33
	<i>Magelona japonica</i>	1.29	3.12	2.01	4.33
	<i>Sternaspis scutata</i>	0.81	3.48	1.92	6.25
	<i>Amphipholis</i> sp.	3.45	0.9	1.86	8.11
	<i>Notomastus latericeus</i>	2.55	0	1.8	9.91
	<i>Theora fragilis</i>	0.75	3.23	1.76	11.67
Feb, 2012 dissimilarity: 73.1%	<i>Apionsoma misakiana</i>	1.75	5.25	2.44	2.44
	<i>Cirrophorus</i> sp.	0	2.94	1.99	4.43
	<i>Polydora</i> sp.	2.76	0	1.88	6.31
	<i>Euclymene oerstedii</i>	0.89	3.34	1.8	8.11
	<i>Sigambra tentaculata</i>	0.59	2.98	1.62	9.73
	<i>Magelona</i> sp.2	0	2.31	1.61	11.34
Apr, 2012 dissimilarity: 75.2%	<i>Mediomastus californiensis</i>	0	3.18	2.45	2.45
	<i>Sigambra tentaculata</i>	0	2.66	2.08	4.53
	<i>Cirrophorus</i> sp.	0	2.47	1.94	6.47
	<i>Apionsoma misakiana</i>	1.78	3.92	1.88	8.35
	<i>Tharyx</i> sp.2	0	2.35	1.86	10.21
	<i>Angulus vestalioides</i>	0	2.04	1.61	11.83
	<i>Amaeana occidentalis</i>	0	2.03	1.61	13.44
	<i>Euclymene oerstedii</i>	0	1.92	1.49	14.93
	<i>Raetella pulchella</i>	2.94	1.19	1.44	16.37
May, 2012 dissimilarity: 67.8%	<i>Magelona japonica</i>	2.86	3.2	3.46	3.46
	<i>Apionsoma misakiana</i>	2.65	0.59	2.97	6.43
	<i>Nephtys oligobranchia</i>	2.04	0	2.6	9.04
	<i>Heteromastus filiformis</i>	1.94	0	2.48	11.51
	<i>Sternaspis scutata</i>	3.59	1.77	2.41	13.92
	<i>Lumbrineris longifolia</i>	0.42	1.96	2.33	16.25
	<i>Baseodiscus</i> sp.	1.67	0	2.17	18.42
	<i>Sigambra tentaculata</i>	2.99	1.37	2.16	20.58
	<i>Amphipholis</i> sp.	1.51	0	2.1	22.67

*Data were transformed by fourth root

군집 구조

2011년 고리 2호기 발전 정지 전 8월에 조사된 대형저서동물의 군집구조는 발전소 인근 지역(D1, E1, N1)(A)과

남동하부 지역(B)과 북동지역(C)으로 구분되어졌다(Fig. 5). A 그룹의 정점(발전소 취수구 제외)들은 발전소 기준으로 반경 3 km 안에 포함되었다. 발전 정지 기간인 9월

Fig. 4. Density (ind./m²) of dominant species of macrofauna at sampling site

의 대형저서동물 군집구조는 남쪽 S1 정점을 제외한 발전소 배수구 주변 지역에 속한 A 그룹(D1, E1, N1)은 8월에 비해 폭이 좁아졌으며, 북쪽으로 N3 정점까지 포함하였

다. 반면에 B 그룹은 연안을 따라 N2, E2, S3 정점으로 구성되어졌다. 발전 재가동 후인 10월의 대형저서동물 군집구조는 크게 3개의 그룹으로 구분되어졌다(Fig. 6). 발

Fig. 5. Clustering analysis from macrobenthic fauna at each sampling date

Fig. 6. nMDS ordination of Bray-Curtis similarity from fourth-root transformed species density data. (S, September 2011; O, October 2011; F, February 2012; A, April 2012; M, May 2012)

전소 인근에 위치한 A 그룹(S1, D1, E1, N1)은 9월에 군집이 좀 더 확장되었으며, B 그룹은 9월과 차이가 없었다.

2012년 발전 정지 전 2월 대형저서동물 군집구조는 2011년과 비교했을 때, 군집의 범위가 발전소를 중심으로 매우 좁아졌다(Fig. 5). A 그룹(E1, D1, S1)은 2011년 8월에 비해 남쪽으로 치우쳐 졌으며, 그룹의 범위도 좁았다. 또한 B 그룹은 S2, N1 정점만 포함하고 있으며, 2001년 B 그룹에 속한 정점들은 모두 C 그룹에 포함되었다. 2012년 4월 발전 정지 기간 동안의 군집구조는 2월의 A 그룹에 속한 정점 가운데, D1 정점만 A 그룹으로 남아 있었으며, 나머지 S1, E1 정점들은 B 그룹에 속하였다. C 그룹은 2월과 차이가 없었다. 발전 재가동 후 5월에는 발전소 배수구 인근을 중심으로 남쪽 정점까지 A 그룹(D1, E1, N1, N2, S1, S2, S3)과 외측에 위치한 B 그룹(E2, E3, N3)으로 구분되었다. 발전 정지 중에 비해 재가동 후의 군

집구조는 연안역을 따라 남쪽으로 확장되어졌다. 조사 기간 동안 발전소 인근에 위치한 A 그룹과 주변 B 그룹을 구분하게 하는 종들은 대부분 주요 우점종인 다모류 *Magelona japonica*(양손갯지렁이), 성구동물인 *Apionsoma misakiana*, 다모류 *Mediomastus californiensis*(버들갯지렁이류), *Sternaspis scutata*(오뚜기갯지렁이) 등이었다 (Table 2).

조사 기간 동안 대형저서동물의 군집구조에 영향을 주는 환경요인을 BIO-ENV를 통해 분석하였다(Table 3). 2011년 4호기 발전 정지 기간 중(9월)에는 저층 수온이 대형저서동물의 군집구조에 큰 영향을 주었다. 반면에 발전이 재가동 되는 10월의 경우, 대형저서동물의 군집구조에 영향을 주는 환경요인은 저층 수온, 저층 염분, 총유기탄소, 퇴적물의 펄 함량 등으로 증가하였다. 2012년 2호기

발전 정지 전에는 저층 수온, 총 유기탄소량, 엽록소 양, 퇴적물의 분급도 등이 대형저서동물 군집구조에 영향을 주었다. 그러나 발전 정지 기간 중에는 퇴적물의 유기물 양과, 퇴적물 입도가 군집구조에 영향을 주었으나, 저층 수온은 군집구조에 영향을 주지 않았다. 발전이 재가동 되는 5월에는 퇴적물의 펄의 함량, 총 유기탄소 함량, 엽록소 양 등과 함께 저층 수온이 대형저서동물의 군집구조에 영향을 주는 요인으로 나타났다. 수온이 높은 2011년에는 발전 정지와 재가동 상관없이 저층의 수온이 저서동물의 군집구조에 큰 영향을 주는 환경요인으로 나타났지만, 수온이 낮은 2012년의 경우, 발전 정지 전과 재가동 기간에만 저층 수온이 대형저서동물의 군집구조에 영향을 주었다.

대형저서동물의 종수와 개체수 그리고 다양도, 생체량,

Table 3. Major environmental variables affecting the macrobenthic community by BIO-ENV analysis

Date	Number of variables	Correlation (%)	Best variables
Sep 2011	1	0.512	bottom temperature
	2	0.489	bottom temperature, bottom salinity
Oct 2011	3	0.761	bottom salinity, total organic carbon (TOC), clay %
	4	0.761	bottom temperature, salinity, TOC, clay %
Feb 2012	5	0.715	bottom temperature, TOC, Chl a, sorting value of sediment, Total nitrogen
	5	0.710	bottom temperature, TOC, Chl a, mean grain size, sorting value of sediment
Apr 2012	2	0.312	TOC, mean grain size
	3	0.305	dissolved oxygen, TOC, mean grain size
May 2012	5	0.707	bottom temperature, SS, Chl a, silt %, TOC
	3	0.701	bottom temperature, Chl a, TOC

Table 4. Spearman rank correlation within the environmental variables and dominant species in all sampling periods (*, $p < 0.05$)

	Temp.	Salinity	DO	MZ	TOC in sediment	Sand %
Number of species	0.57*	-0.55*	0.03	-0.40*	-0.02	0.41*
Density	0.40*	-0.35*	-0.08	-0.34*	-0.23	0.36*
J'	0.251	-0.35*	0.16	-0.31	0.38*	0.34*
H'(log _e)	0.49*	-0.55*	0.16	-0.43*	0.25	0.45*
Biomass	0.28*	-0.18	0.06	0.09	-0.27	-0.07
<i>Magelona japonica</i>	-0.14	0.21	0.06	0.1	-0.09	-0.21
<i>Apionsoma misakiana</i>	0.17	-0.225	-0.02	-0.32	-0.31	0.41*
<i>Mediomastus californiensis</i>	0.38*	-0.34*	-0.16	-0.20	0.31	0.17
<i>Spiophanes bombyx</i>	0.30*	-0.31*	-0.02	-0.40*	-0.17	0.43*
<i>Lumbrineris longifolia</i>	-0.34*	0.41*	-0.19	0.39*	-0.11	-0.37*
<i>Raetella pulchella</i>	0.59*	-0.43*	-0.36*	-0.14	-0.27	0.14
<i>Ampelisca naikaiensis</i>	-0.16	0.11	0.07	0.27	-0.09	-0.24
<i>Amphipholis</i> sp.	0.24	-0.26*	0.16	-0.20	0.20	0.19
<i>Sternaspis scutata</i>	0.06	0.01	0.06	0.12	-0.14	-0.14

Table 5. A significant ($p < 0.05$) coefficient of Spearman rank correlation within the environmental variables and dominant species in each year

	2011					2012				
	Temp	Salinity	DO	MZ	TOC	Temp	Salinity	DO	MZ	TOC
S	0.675	-0.622	0.464	-0.422				0.546		
N			0.464	-0.49						-0.62
J'	0.464	-0.496							-0.758	0.618
H'(log _e)	0.716	-0.679				-0.425		0.435	-0.735	
<i>Mediomastus californiensis</i>					0.562			0.616		
<i>Spiophanes bombyx</i>			0.61	-0.477						
<i>Lumbrineris longifolia</i>	-0.520	0.519								
<i>Raetella pulchella</i>	0.497	-0.453	0.493						0.615	
<i>Ampelisca naikaiensis</i>		0.474						0.660		

우점종 들과 환경요인과의 상관관계 분석을 실시하였다. 대형저서동물의 종수와 개체수 그리고 종 다양도는 저층 수의 수온 증가와 함께 유의한 양의 상관관계를 가졌으며, 염분의 증가와는 음의 상관관계를 보였다(Table 4). 또한 저서동물의 종수와 개체수 그리고 종 다양도는 모래의 함량이 증가할수록(퇴적물 입도가 조립할수록) 유의한 양의 상관관계를 보였다. 주요 우점종 가운데, 기회주의적인 특성을 보이는 버들갯지렁이(*M. californiensis*)와 민얼굴갯지렁이(*S. bombyx*)는 수온과 양의 상관관계를 그러나 염분과는 음의 상관관계를 보였으나, 긴자락송곳지렁이(*L. longifolia*)는 수온과는 음의 상관관계를 염분과는 양의 상관관계를 보였다. 또한 민얼굴갯지렁이(*S. bombyx*)와 긴자락송곳지렁이(*L. longifolia*)는 퇴적물의 평균 입도와는 서로 반대의 상관관계를 보였다(Table 4). 계절적인 차이에 따른 대형저서동물의 종 조성과 저층 수온과의 상관관계를 분석하기 위하여 2011년과 2012년으로 구분하여 상관관계 분석을 실시한 결과, 여름철(8월) 이후에 예방 정비가 시작된 2011년의 경우, 대형저서동물의 종수와, 종 다양도는 수온과 높은 양의 상관관계를 보였지만, 겨울철(2월)에 예방 정비가 시작된 2012년의 경우, 저층 수온과는 상관관계를 보이지 않았다(Table 5).

4. 고찰

2011년부터 2012년까지 조사 기간 동안 출현한 대형저서동물의 총 출현 종수와 개체수는 369종/13.2 m²와 1,712개체/m²이었으며, 조사 기간 별 138~231종/2.2 m²가 출현하였다. 기존 고리 주변 해역에 출현하는 대형저서동물의 종수는 2004년에 215종/8 m²(개체수: 722/m²; 신 2006) 그리고 2006년에 157종/7.2 m²(개체수: 552/m²; 김 등 2011), 본 연구에서 출현하는 총 종수와 개체수와는 많은 차이가 있었다. 신 (2006)과 김 등 (2011)의 조사는

고리 원전을 경계로 남쪽에 위치해 있는 조사 정점에서 4회 실시하였으나, 본 연구에서는 고리 원전을 중심으로 방사형(남/북/동쪽) 조사 정점에서 6회 조사를 실시하였다. 또한 본 연구에서 모래 함량이 높은 정점에서의 종수와 개체수가 높았으며, 기존 연구에 비해 상대적으로 모래 함량이 높은 정점수가 많았다. 김 등 (2011)은 고리 주변 해역에서 모래 함량이 높은 지역에 종수와 개체수가 높았다고 보고하였다. 또한 동해 중부 연안 후포 사질조하대에 출현하는 대형저서동물의 종수는 총 319종(개체수: 1,972/m²)이었으며(백 등 2007), 울진 원전 주변 조하대에 서식하는 대형저서동물의 종수는 334종으로(유 등 2011), 본 조사 결과와 유사한 경향을 보였다. 그러므로 동일 지역에 출현하는 대형저서동물의 종수와 개체수의 차이는 채집 정점 수와 퇴적상이 다른 채집 정점의 영향이 큰 것으로 여겨진다.

2011년 여름철 이후 고리 4호기 발전 정지 전, 중, 가동 후 동안 발전소 배수구 주변 정점(E1, N1, S1)에서의 종수는 정지 중인 9월에 비하여 10월에 감소하는 경향을 보였다(Fig. 3). 반면에 D1(배수구 앞) 정점에서는 종수 변화가 나타나지 않았다. 출현 개체수와 생체량의 변화는 D1 정점에서는 증가한 반면, 주변 N1, E1, S1 정점에서는 감소하였다. 이러한 현존량 감소는 온배수 영향을 받는 지역에서의 지속적인 온배수 유입과 원활한 해수순환으로 인하여(유 등 2011), 또는 높은 수온 환경에 서식이 적합한 온수종과 기회종의 개체수는 다른 지역에 비해 높은 것으로 보고된 Bamber and Spencer (1984)의 결과와 잘 일치하였다. 또한 이 연구에서 발전 정지와 재가동 이후 온배수의 배출량 차이에 따른 수온 변화 폭이 D1 정점보다는 배수구 주변 정점에서 크게 나타났다(Fig. 2). 그러므로 온배수 배출 감소에 따른 대형저서동물의 종수와 개체수 감소는 수온이 상대적으로 높은 8-10월에 배수구를 제외한 수온 변화 폭이 큰 주변 정점(E1, S1, N1)에서 크게 나타

나고 있는 것으로 여겨진다.

반면에 2012년 겨울철 고리 2호기 발전 정지 전과 중의 대형저서동물의 종 조성은 발전소 배수구 주변 정점(D1, E1, N1, S1) 가운데 배수구 앞에 위치한 D1 정점에서 종수와 개체수 모두가 감소하는 경향을 보였으나, 주변 E1, S1, N1 정점에서는 종수 또는 개체수가 증가하는 경향을 보였다(Fig. 3). 특히 발전소 배수구 인근 정점에서 갑각류 중 단각류 종수와 개체수가 급격히 감소하였다. 온배수 영향 지역에서 발전이 일시적으로 정지되었을 때, 해양생물에 미치는 영향은 겨울철에 크게 나타나며(Pilati 1976), 이는 겨울철에 해양생물이 가지는 수온 내성 범위가 다른 계절보다 좁기 때문이며, 많은 생물들은 겨울철 배수구 수온에 적응되어 있다는 연구(Pilati 1976; McLennan and Miller 1990)와 관련이 있는 것으로 여겨진다. 특히 2012년의 경우, 고리 1호기 발전이 조사 기간 동안 계속해서 중지되어, 고리 2호기 발전 정지에 따른 배수구 주변 해역에서의 수온 변화는 다른 계절에 비해 상대적으로 컸다. 따라서 2012년 겨울철 온배수 감소에 의한 배수구 주변 지역에서의 급격한 수온 변화는 이곳에 적응하여 살고 있는 생물에 더 큰 영향을 줄 수 있다. 그러므로 온배수 영향 지역의 사질에서 적응하여 사는 민얼굴갯지렁이(*S. bombyx*) 및 기회종인 버들갯지렁이(*M. californiensis*)가 겨울철 이후 2-5월 기간 동안 온배수 배출 감소에 의한 환경변화에 민감하게 반응하는 것으로 여겨진다.

대형저서동물의 군집구조에 영향을 주는 환경 요인 가운데, 저층 수온은 발전 정지와 정지 중 그리고 재가동 후에 대형저서동물 군집구조 변화에 중요한 요인으로 나타났다(Table 3). 그러나 2012년 겨울 이후, 고리 1호기와 2호기 발전이 모두 정지된 기간에 대형저서동물의 군집구조는 저층 수온이 영향을 받지 않았으나, 발전이 재가동되면서 군집구조는 다시 저층 수온의 영향을 받았다. 2012년 발전 정지 이후의 대형저서동물의 군집구조는 2011년의 군집구조 보다 발전소 배수구 인근 정점(D1, E1)에서 변화가 크게 나타났다(Fig. 6). 온배수 영향 지역과 영향이 없는 지역에서 대형저서동물의 공간적인 군집구조는 온배수에 의한 영향보다는 계절적인 변화가 더 크게 나타난다(Lardicci et al. 1999). 반면에 지속적인 온배수 영향 지역 내에서의 대형저서동물 군집구조는 계절적인 변화는 크지 않다(유 등 2011). 본 연구에서 2011년의 여름철 이후의 1개 호기 발전 정지에 의한 수온 변화 보다는 2012년의 겨울철 이후 2개 호기의 발전 정지에 의한 수온 변화가 크게 나타났다(Fig. 2). 그러므로 본 연구에서 두 기간 동안의 대형저서동물의 군집구조 차이는 계절에 따른 수온 변화와 발전 정지 호기 양에 따른 저층 수온 변화의 복합적 영향을 받는 것으로 여겨진다.

대형저서동물의 종수와 개체수 그리고 종 다양도는 저

층수의 수온 증가와 함께 유의한 양의 상관관계를 보였으며, 주요 우점종 가운데, 기회주의적인 특성을 가지는 버들갯지렁이(*M. californiensis*)와 민얼굴갯지렁이(*S. bombyx*)는 수온과 양의 상관관계를 보였으며, 긴자락송곳갯지렁이(*L. longifolia*)는 음의 상관관계를 보였다. 특히 배수구 인근 정점에서 우점하는 버들갯지렁이(*M. californiensis*)의 개체수는 발전 정지 중에는 감소하였다가, 발전이 재가동 된 후 개체수가 급격히 증가하였다. Lardicci et al. (1999)은 온배수 영향 지역에서 기회종들은 출현하지 않으며, 대형저서동물의 종 조성은 퇴적물의 입자 크기에 영향을 받는다고 했다. 그러나 미국 플로리다의 발전소 배수구 근처에서는 기회주의적인 *Capitella capitata*의 개체수가 높게 출현하고 있다(Mahadevan 1980). 또한 온도에 내성이 높은 종들의 개체수가 배수구 인근에서 증가한다(Bamber and Spencer 1984; 유 등 2011). 그러므로 본 연구 지역의 발전소 배수구 인근에서 우점하는 종들은 수온 변화 이후 서식 환경 변화에 민감하게 반응하는 기회주의적인 특성을 가지고 있는 것으로 여겨진다. 계절적인 차이에 따른 대형저서동물의 종 조성과 저층 수온과의 상관관계를 분석하기 위하여 2011년과 2012년으로 구분하여 상관관계 분석을 실시한 결과, 여름철 이후에 예방 정비가 시작된 2011년의 경우, 대형저서동물의 종수와, 종 다양도는 수온과 높은 양의 상관관계를 보였지만, 겨울철에 예방 정비가 시작된 2012년의 경우, 저층 수온과는 상관관계를 보이지 않았다. 이와 같은 이유는 2011년 보다는 2012년 동안 계절적인 낮은 수온과 2호기 발전 정지 전과 중 그리고 재가동 동안 1호기의 지속적인 발전 정지에 따른 온배수 배출 감소가 크게 나타나, 수온의 변화가 배수구 인근에 한정되어 나타났기 때문으로 여겨진다. 그러므로 향후, 계절적인 온배수의 배출량의 차이에 따른 수온의 변화와 대형저서동물 종 조성의 상관 연구는 더 필요할 것으로 여겨진다.

사 사

이 논문을 세심히 검토해 주시고 의견을 주신 두 분의 심사위원에 깊은 감사를 드립니다. 이 연구는 한국수력원자력(주)의 “원전 일시정지에 의한 해양생태계 영향 조사(PI55400)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김대익, 서인수, 문창호, 최병미, 정래홍, 손민호 (2011) 동해 기장군 주변해역에 서식하는 대형저서동물의 군집구조. 한국해양학회지 「바다」 16(2):97-105
- 백상규, 강래선, 전재욱, 이재학, 윤성규 (2007) 동해 후포주

- 변 사질조하대에 서식하는 대형저서동물군집의 분포특성. *Ocean and Polar Res* **29**:123-134
- 신연주 (2006) 동해안 고리원전 주변 조하대의 대형저서동물 군집의 구조. 이학석사 학위논문, 대구대학교, 154 p
- 유옥환, 백상규, 이형근, 이재학 (2011) 울진 주변 해역 대형 저서동물 군집의 시공간 분포와 환경요인과의 관계. *Ocean and Polar Res* **33**:421-434
- Bamber RN (1990) Power station thermal effluents and marine crustaceans. *J Therm Biol* **15**:91-96
- Bamber RN, Spencer JF (1984) The benthos of a coastal power station thermal discharge canal. *J Mar Biol Assoc Uk* **64**:603-623
- Bedulina DS, Zimmer M, Timofeyev MA (2010) Sub-littoral and supra-littoral amphipods respond differently to acute thermal stress. *Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol* **155**:413-418
- Buchanan JB, Sheader M, Kingston PF (1978) Sources of variability in the benthic macrofauna off the south Northumberland coast, 1971-1976. *J Mar Biol Assoc Uk* **58**:191-209
- Burton DT, Abell PR, Capizzi TP (1979) Cold shock: effect of rate of thermal decrease on Atlantic Menhaden. *Mar Pollut Bull* **10**:347-349
- Clarke KR, Warwick RM (2001) Change in Marine Communities: an Approach to Statistical Analysis and Interpretation, 2nd edn. PRIMER-E, Plymouth, 127 p
- Crema R, Pagliai AMB (1980) The structure of benthic communities in an area of thermal discharge from a coastal power station. *Mar Pollut Bull* **11**:221-224
- Gray J (1981) The ecology of marine sediments-an introduction to the structure and function of benthic communities. Cambridge Univ Press, New York, 185 p
- Hoey GV, Degraer S, Vincx M (2004) Macrobenthic community structure of soft-bottom sediments at the Belgian Continental Shelf. *Estuar Coast Shelf Sci* **59**:599-613
- Lardicci C, Rossi F, Maltagliati F (1999) Detection of thermal pollution: variability of benthic communities at two different spatial scales in an area influenced by a coastal power station. *Mar Pollut Bull* **38**:296-303
- KEPRI (2012) Environmental survey and assessment around the Kori nuclear power plant (2011 annual report). KEPRI Technical report, TR.132F.S2012.0077, 392 p
- Mahadevan S (1980) A study on the effects of power plant thermal discharges on benthic infaunal communities at Big Bend, Tampa Bay (Florida). *Florida Sci* **43**:7
- McLennan AG, Miller D (1990) A biological role for the heat shock response in crustaceans. *J Therm Biol* **15**:61-66
- Pilati DA (1976) Cold shock: biological implications and a method for approximating transient environmental temperatures in the near-field region of a thermal discharge. *Sci Total Environ* **6**:227-237
- Riera R, Nunez J, Martin D (2011) Effects of thermal pollution on the soft-bottoms surrounding a power station in the Canary Islands (NE Atlantic Ocean). *Oceanology* **51**:1040-1046
- Rossi F, Como S, Corti S, Lardicci C (2001) Seasonal variation of a deposit-feeder assemblage and sedimentary organic matter in a brackish basin mudflat (Western Mediterranean, Italy). *Estuar Coast Shelf Sci* **53**:181-191
- Schneider CW (1981) The effect of elevated temperature and reactor shutdown on the benthic marine flora of the millstone thermal quarry, Connecticut. *J Therm Biol* **6**:1-6
- Shannon CE, Weaver W (1963) The mathematical theory of communication. University of Illinois Press, Illinois, 177 p
- Shiah FK, Wu TH, Li KY, Kao SJ, Tseng YF, Chung JL, Jan S (2006) Thermal effects on heterotrophic processes in a coastal ecosystem adjacent to a nuclear power plant. *Mar Ecol Prog Ser* **309**:55-65
- Somerfield PJ (2008) Identification of the Bray-curtis similarity index: comment on Yoshioka (2008). *Mar Ecol Prog Ser* **372**:303-306
- Smythe AG, Sawyko PM (2000) Field and laboratory evaluations of the effects of "cold shock" on fish resident in and around a thermal discharge: an overview. *Environ Sci Policy* **3**:225-232
- Snøeijls PJM, Prentice IC (1989) Effects of cooling water discharge on the structure and dynamics of epilithic algal communities in the northern Baltic. *Hydrobiologia* **184**:99-123
- Suresh K, Ahamed MS, Durairaj G, Nair KVK (1993) Impact of power plant heated effluent on the abundance of sedentary organism, off Kalpakkam, east coast of India. *Hydrobiologia* **268**:109-114
- Teixeira TP, Neves LM, Araujo FG (2012) Thermal impact of a nuclear power plant in a coastal area in Southeastern Brazil: Effects of heating and physical structure on benthic cover and fish communities. *Hydrobiologia* **684**:161-175
- Weissberger EJ, Jumars PA, Mayer LM, Schick LL (2008) Structure of a northwest Atlantic Shelf macrofaunal assemblage with respect to seasonal variation in sediment nutritional quality. *J Sea Res* **60**:164-175
- Weston DP (1988) Macrobenthos-sediment relationships on the continental shelf off Cape Hatteras, North Carolina. *Cont Shelf Res* **8**:267-286

Received Sep. 5, 2013

Revised Nov. 12, 2013

Accepted Dec. 17, 2013