

## 고리원전의 온배수 방출이 주변 해조군집에 미치는 영향

김영환\* · 안중관 · 윤희동 · 장민아

(충북대학교 생명과학부)

### Effects of Heated Effluents on the Intertidal Macroalgal Community Near Gori Nuclear Power Plant

Young Hwan Kim\*, Jung Kwan Ahn, Hee Dong Yoon and Min A Jang

School of Life Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

This study is intended to clarify the effects of heated effluents on intertidal benthic marine algal community in Korea. The species composition and biomass of marine algae at the discharge canal of Gori nuclear power plant on the southeastern coast of Korea were investigated seasonally from February 2001 to October 2006. As a result, 54 species (7 blue-green, 12 green, 9 brown and 26 red algae) of marine algae were found at the discharge canal during the past six years. In general, the number of species observed was abundant during winter to spring and less in autumn. *Enteromorpha compressa*, *E. intestinalis*, *E. prolifera* and *Caulacanthus ustulatus* were common species found more than 80% frequency during the study period. Seasonal fluctuations of mean biomass were 1-440 g dry wt m<sup>-2</sup> and dominant species in biomass were *Enteromorpha* spp. (contribution to a total biomass proportion 28%), *Sargassum horneri* (14%) and *Amphiroa beauvoisii* (14%). It is evident from the floristic composition and biomass data that unique micro-environment of the discharge canal support different communities from those on the intake or control area. Results from the large numbers of surveys before and during plant operation showed that, in the regions influenced by thermal effluents such as the discharge canal of power plants, the process of ecological succession has been proceeded. It is assumed that the uni-directional water flow and the time of overhaul largely affect the development and succession of benthic marine algal communities of the discharge canal.

**Key Words:** Gori, heated effluents, marine algae, nuclear power plant

#### 서 론

1970년대 이후 우리 사회의 생활수준이 향상되고 특히 산업이 급속도로 발전하면서 편리한 에너지인 전기에너지를 엄청나게 요구하게 되었다. 세계에서도 유례를 찾기 어려울 정도로 높은 전력 수요의 증가를 충족하기 위하여 우리나라에서는 20세기 후반부터 연안 곳곳에 대용량 화력발전소나 원자력발전소의 건설이 추진되었다.

그런데 우리나라 연안에 세워진 화력발전소나 원자력발전소는 모두 관류냉각방식(once-through cooling system)을 채택하고 있어서 필연적으로 다량의 온배수를 주변 해역으로 방출하게 된다(IAEA 1974). 열에너지의 첨가는 주변 해양생

태계의 구성 양식과 안정성을 교란시킬 가능성을 안고 있으며(Glasstone and Jordan 1980), 특히 고착성 해조류는 온배수의 영향을 파악하는 지표생물의 하나로 간주된다(Langford 1990; 김 2000).

외국의 경우 1960년대부터 발전소 가동에 따른 온배수의 영향에 관심을 가져왔으며, 이미 1970년대에 두 차례에 걸쳐 열생태학 분야의 대규모 심포지엄이 열리면서 귀중한 연구 결과가 축적되었다(Gibbons and Sharitz 1974; Esch and McFarlane 1976). 세계 각국에서 수행된 다양한 연구들로부터 수온의 변화가 해조류의 성장과 분포에 미치는 영향이 다각적으로 구명되었고(Langford 1990), 이와 같은 노력은 금세기에 들어서도 지속되고 있다.

이를테면 Steinbeck *et al.* (2005)은 미국 California의 Diablo Canyon 발전소에서 배출되는 온배수가 주변의 조간대 해양생물 군집에 미치는 영향을 조사하여 발전소의 가동

\*Corresponding author (kimyh@chungbuk.ac.kr)

이후 온배수의 영향을 받는 곳에서는 해조류 가운데 엽상조류(foliose algae)의 피도가 감소하고 각상조류(crustose algae)의 피도가 증가하며, 군집의 다변량분석 결과 온배수의 영향을 받는 곳에서는 지속적으로 변화가 나타나는 것으로 보고하였다. 한편 Keser *et al.* (2005)은 미국 Connecticut의 Millstone 발전소 부근에서 갈조 아스코필룸(*Ascophyllum nodosum*)의 생장을 조사한 결과, 25°C보다 낮은 정점에서는 아스코필룸의 생장이 증진되었지만, 25°C 이상의 정점에서는 생장률이 급격하게 감소하고 27-28°C 부근에서 치사현상이 나타난다고 밝혔다.

한편 우리나라에서는 고리원자력발전소의 가동을 전후한 1977-1978년의 발전소 주변 해조군집의 변화를 밝힌 김과 이(1980)의 보고를 필두로, 열생태학적 측면의 다양한 연구결과가 축적되었다(김 1999 참조). 그 가운데 특히 고리원자력발전소는 국내 최초의 원자력발전소라는 관점에서 연구자들의 많은 관심을 받아 왔으며, 김과 이(1980)가 발전소의 가동 전인 1977년과 가동을 개시한 1978년의 해조군집 변동을 비교한 이래 지금까지 30년간 다양한 연구결과가 축적되었다(김 1986, 1993; 김 등 1992, 1998; 김과 손 1993; 김과 안 2005). 그런데 최근에 현존하는 고리원자력발전소 인근에 신고리 원전 1-4호기가 건설되고 있으며(김 2003), 이와 같은 후속기의 계속적인 건설과 가동은 발전소 주변 해조군집의 다양성과 풍부성을 변모시킬 가능성을 안고 있다.

따라서 본 연구에서는 후속기가 건설되고 있는 동해안의 고리원자력발전소를 대상으로 최근 6년간 배수로에 출현하는 해조류를 중심으로 발전소 주변 해조군집의 정성·정량적 변화를 조사하는 한편, 지난 30년간의 배수로 주변 해조군집의 변동 자료를 종합한 결과를 보고하고자 한다. 환경영향 평가를 계획하고 적절한 대책을 수립하는데 있어서 장기간에 걸친 군집구조의 변동을 추적함이 매우 중요하므로(Schiel *et al.* 2004; Steinbeck *et al.* 2005), 이 연구는 해조군집에 미치는 발전소 온배수의 영향을 밝히고 대책을 모색할 수 있다는 점에서 그 의의를 찾을 수 있을 것이다. 나아가서 배수로와 같이 독특한 미세환경에 분포하는 해조류의 다양성과 풍부성에 관한 자료의 확보는 향후 국내의 열생태학적 연구에서 중요한 정보를 제공하게 될 것으로 기대된다.

## 재료와 방법

2001년 2월부터 2006년 10월에 이르기까지 6년간 계절별로 동해안 고리원자력발전소의 1호기 배수로에서 해조류의 종조성과 생물량을 조사하였다. 아울러 발전소 배수로에 출현하는 해조류의 정성·정량적 특성을 파악할 목적으로 냉각수가 유입되는 1호기 취수로와 온배수의 영향을 받지 않을 것으로 판단되는 지점인 대송리를 대조구로 지정하고 동일

한 내용의 조사를 실시하여 그 결과를 비교 검토하였다. 조사지에 대한 설명은 전보(김 등 1998; 김과 안 2005)에 상세하게 언급되어 있다.

### 해조류의 종조성 조사

발전소 배수로에 생육하는 해조류의 종조성을 파악하기 위하여 온배수가 주변 해수와 혼합되기 전의 배수로에 생육하는 해조류를 가능한 한 넓은 범위에서 채집하였으며, 취수로와 대조구에서도 동일한 방법으로 해조류 출현을 조사하였다.

채집된 재료는 현장에서 10% 포르말린 해수 용액으로 고정시켜 실험실로 운반하여 검경 동정하였다. 동정된 해조류의 학명과 목록 정리는 Yoshida *et al.* (1995)에 따랐고, 해조류의 국명은 이와 강(1986, 2002)에 따랐다.

### 해조류의 생물량 조사

생물량 측정을 위하여 배수로의 해조군집을 대표할 수 있는 암반 또는 방파제 테트라포드 상에 3-5개씩의 0.5 m × 0.5 m 방형구를 설치하고, 방형구 내의 모든 해조류를 호미 등으로 완전히 수거한 후 10% 포르말린 해수 용액으로 고정하여 실험실로 운반하였다. 한편 종조성 조사의 경우와 마찬가지로 취수로와 대조구에서도 동일한 방법으로 생물량 조사를 실시하였다.

이렇게 각 방형구별로 채집된 재료는 실험실에서 담수로 충분히 씻고 종류별로 구분하여 건조로(drying oven)에서 105°C로 24-48시간 건조시켰다. 완전히 건조된 시료를 건조기(desiccator)에서 식힌 다음, 그 무게를 0.01 g 수준까지 측정하여 단위면적(m<sup>2</sup>)당 무게로 환산하고, 해조류 종류별 생물량 평균치와 단위면적당 현존량 구성비(%)를 구하였다(김 등 1995, 1997; 김과 허 1998).

## 결과 및 고찰

2001년 2월부터 2006년 10월에 이르기까지 6년간 계절별로 고리원자력발전소 배수로를 중심으로 얻어진 조사 결과를 살펴보고, 이를 토대로 지난 30년간의 배수로 주변 해조군집의 변동을 해석한 결과는 다음과 같다.

### 배수로 해조류의 종조성

고리원자력발전소 배수로에서는 6년에 걸친 조사를 통하여 총 54종(남조류 7종, 녹조류 12종, 갈조류 9종, 홍조류 26종)의 해조류가 관찰되어 홍조류가 총출현종수의 절반에 가까운 48%로 가장 많이 나타났다(Table 1). 이들 해조류 가운데 녹조 갈과래과(Ulvaceae)와 홍조 산호말과(Corallinaceae)가 공히 7종으로 가장 다양한 구성을 보였으



**Table 2.** Common species (frequency ≥ 50%) at the discharge canal of Gori nuclear power plant and their frequencies of occurrence in each division

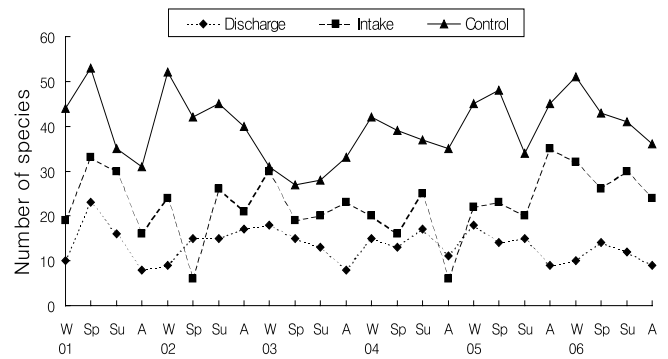
Division	Species	Occurrence	Frequency (%)
Cyanophyta	<i>Oscillatoria brevis</i>	18	75
Chlorophyta	<i>Enteromorpha compressa</i>	23	96
	<i>Enteromorpha intestinalis</i>	21	88
	<i>Enteromorpha prolifera</i>	20	83
	<i>Ulva pertusa</i>	16	67
	<i>Enteromorpha linza</i>	13	54
Phaeophyta	<i>Padina arborescens</i>	16	67
	<i>Sargassum horneri</i>	12	50
Rhodophyta	<i>Caulacanthus ustulatus</i>	22	92
	<i>Amphiroa beauvoisii</i>	18	75
	<i>Gelidium amansii</i>	15	63
	<i>Corallina pilulifera</i>	14	58
	<i>Grateloupia ramosissima</i>	13	54
	<i>Ahnfeltiopsis flabelliformis</i>	13	54

며, 홍조 지누아리과(Halymeniaceae)가 6종, 그리고 남조 흔들말과(Oscillatoriaceae)가 5종으로 나타났다.

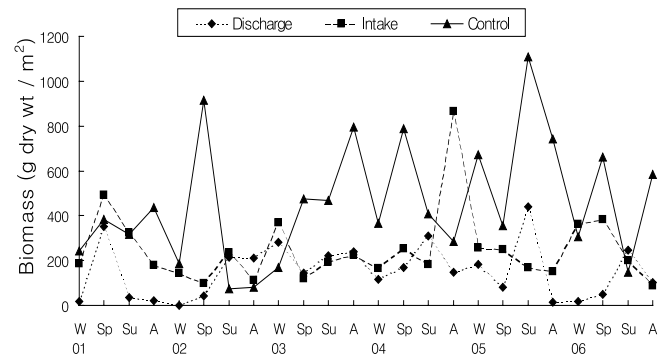
조사시기별로는 8-23종의 범위로 해조류가 관찰되었는데 대체로 겨울과 봄에 다소 많고 가을에 출현종수가 적은 계절적 추세를 보였다. 자연 환경보다 수온이 높은 발전소 배수로에서 나타나는 이와 같은 해조류 출현의 계절적 변동은 동해안의 다른 발전소를 대상으로 수행된 연구에서도 확인된 바 있다. 이를테면 김과 안(2006)은 2001-2005년의 5년간 월성원자력발전소 배수로에서 해조류 출현을 비교하여 대체로 가을에 출현종수가 감소함을 보고하였다.

2001-2006년에 걸쳐 고리원자력발전소 배수로에서 출현한 해조류 54종 가운데 50% 이상의 출현 빈도를 보인 종은 14종(남조류 1종, 녹조류 5종, 갈조류 2종, 홍조류 6종)이었다 (Table 2). 이 가운데 녹조 남작과래 (*Enteromorpha compressa*)는 지난 6년간 96%의 출현 빈도를 보여서 고리원자력발전소 배수로를 대표하는 해조류로 나타났으며, 그밖에 녹조 창자과래 (*Enteromorpha intestinalis*)와 가시과래 (*Enteromorpha prolifera*), 그리고 홍조 애기가시덤불 (*Caulacanthus ustulatus*) 등도 80% 이상의 비교적 높은 출현 빈도를 보였다. 특히 갈과과래에 속하는 녹조류 5종이 지난 6년간 고리원자력발전소 배수로에서 50% 이상의 출현빈도를 보였음은 주목할 만 하다.

고리원자력발전소의 취수로와 배수로 그리고 대조구인 대송리의 해조류 출현을 비교한 결과, 배수로의 해조류 다양성은 취수로 또는 대조구보다 대체로 낮았으며 (Fig. 1), 조사시기별 평균 출현종수는 배수로에서 14종으로 나타나서 대조구의 평균 출현종수 40종과 취수로의 23종에 비하여 현저하게 낮았다. 이와 같이 배수로의 해조식생이 빈약한 현상은



**Fig. 1.** Seasonal fluctuation of the number of algal species found at the discharge canal, the intake and the control site of Gori nuclear power plant during 2001-2006.



**Fig. 2.** Seasonal fluctuation of the mean biomass value of marine algae found at the discharge canal, the intake and the control site of Gori nuclear power plant during 2001-2006.

1992-2000년에 걸쳐 동해안의 3개 원자력발전소(고리, 월성, 울진)를 대상으로 발전소의 취수로와 배수로 그리고 대조구의 해조류 출현을 비교한 결과에서도 이미 확인된 바 있다 (김과 안 2005). 취수로와 대조구의 해조류 출현 역시 배수로의 경우와 비슷하게 대체로 겨울과 봄에 다소 많이 출현하고 가을에 출현종수가 감소하는 계절적 추세를 보였다.

**배수로 해조류의 생물량**

고리원자력발전소 배수로에서 6년에 걸쳐 조사된 해조류의 단위면적당 평균 생물량은 조사시기별로 1-440 g dry wt m<sup>-2</sup>의 넓은 범위로 나타났다. 계절별로는 2002-2006년에 걸쳐 여름에 생물량이 200 g dry wt m<sup>-2</sup> 이상으로 풍부한 경향을 보였으나, 2001년의 경우에는 봄에 351 g dry wt m<sup>-2</sup>로 가장 많았다.

발전소의 취수로와 배수로 그리고 대조구에서 계절별로 조사된 해조류 생물량을 비교한 결과, 배수로의 생물량이 취수로 또는 대조구보다 대체로 적었다 (Fig. 2). 즉 조사시기별로 측정된 단위면적당 평균 생물량의 최근 6년간 평균치는 배수로에서 153 g dry wt m<sup>-2</sup>로 나타나서 취수로 평균 생물

**Table 3.** Major species in biomass and their mean contribution (%) to a total biomass proportion at three investigated sites around Gori nuclear power plant during 2001-2006

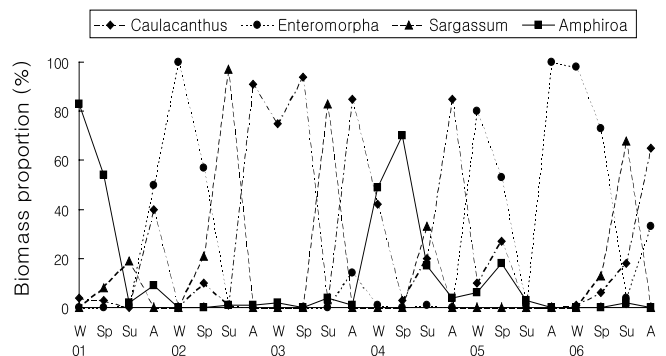
Division	Species	Discharge	Intake	Control
Chlorophyta	<i>Enteromorpha</i> spp.	28	-	1
Phaeophyta	<i>Sargassum horneri</i>	14	11	2
	<i>Padina arborescens</i>	7	1	-
	<i>Colpomenia sinuosa</i>	1	9	1
	<i>Sargassum thunbergii</i>	-	13	17
Rhodophyta	<i>Caulacanthus ustulatus</i>	28	1	-
	<i>Amphiroa beauvoisii</i>	14	5	-
	<i>Gelidium amansii</i>	5	1	-
	<i>Corallina pilulifera</i>	1	26	42
	<i>Chondracanthus tenellus</i>	-	11	-
	<i>Chondria crassicaulis</i>	-	1	7
	<i>Symphyclocladia latiuscula</i>	-	-	11

량의 6년간 평균치 251 g dry wt m<sup>-2</sup>의 60%에 불과하였고, 특히 대조구의 생물량 평균치 457 g dry wt m<sup>-2</sup>의 33%에 불과한 수준으로 나타났다.

6년간에 걸친 생물량 조사를 통하여 발전소의 취수로와 배수로 그리고 대조구에서 나타난 주요종은 다음과 같다 (Table 3).

발전소 배수로에서는 녹조류 파래 무리 (납작파래 *Enteromorpha compressa*, 창자파래 *E. intestinalis*, 잎파래 *E. linza*, 가시파래 *E. prolifera*)와 홍조 애기가시덤불 (*Caulacanthus ustulatus*)이 공히 28%의 평균 구성비를 보였으며, 이들 해조류의 생물량 구성비의 합계는 최근 6년간 배수로에서 조사된 해조류 총 생물량의 절반을 상회하였다. 그 밖에 팽생이모자반 (*Sargassum horneri*)과 고리마디게발 (*Amphiroa beauvoisii*)의 2종 모두 지난 6년간 공히 14%의 생물량 평균치를 보였고, 부챗말 (*Padina arborescens*)이 7% 그리고 우뚝가사리 (*Gelidium amansii*)가 5%의 평균 구성비를 보이는 주요종이었다. 이들 대부분은 지난 1992-2000년의 9년간에 걸친 고리원자력발전소 배수로의 생물량 조사에서도 10% 이상의 평균 구성비를 보인 바 있어서 (김과 안 2005), 최근 15년간 고리원자력발전소 배수로의 해조군집을 대표하는 우점종 해조류로 확인되었다.

이와 같은 배수로 우점종들은 계절적 소장양식에 있어서 흥미로운 특징을 나타내었다 (Fig. 3). 먼저 애기가시덤불과 파래 무리는 대체로 가을부터 겨울에 높은 구성비를 보였으나 수온이 높은 여름에 매우 낮은 비율로 나타났다. 특히 파래 무리의 경우, 2002년 겨울과 2005년 가을에는 배수로 해조류 생물량의 100%를 차지하였다. 한편 팽생이모자반은 상기 2종의 경우와는 달리 여름에 높은 구성비를 보였으며, 고리마디게발은 대체로 겨울과 봄에 많이 출현하는 경향을 보였다.



**Fig. 3.** Seasonal changes in biomass proportion of four dominant species; *Caulacanthus ustulatus*, *Enteromorpha* spp., *Sargassum horneri* and *Amphiroa beauvoisii*.

이와 같은 배수로 우점종들의 계절적 소장양식은 동해안을 대상으로 수행된 연구에서도 비슷한 양상을 보이고 있다. 이를테면 Lee et al. (2001)은 속초 조간대에서 해조류의 피도와 빈도를 조사한 결과를 바탕으로 중요도를 판정한 결과, 애기가시덤불의 중요도가 가을과 겨울에 비교적 높았으나 봄과 여름에는 출현하지 않았다고 보고하였다. 한편 김과 김 (1991)은 월성원자력발전소 배수로 주변의 해조류 생물량을 조사하여 애기가시덤불이 가을부터 봄에 걸쳐 우점종 또는 준우점종으로 나타나는 반면, 여름에는 팽생이모자반이 우점종으로 나타났다고 보고한 바 있다.

생물량으로 본 우점종 구성양식은 냉각수가 유입되는 발전소 취수로나 대조구에서 배수로의 경우와 상이한 양상을 보였다. 먼저 취수로에서는 홍조 작은구슬산호말 (*Corallina pilulifera*)이 26%의 평균 구성비를 보이는 우점종으로 밝혀졌는데, 이 종은 배수로에서 최근 6년간 단지 1%의 평균치를 보였을 따름이다. 그밖에 지층이 (*Sargassum thunbergii*), 팽생이모자반, 돌가사리 (*Chondracanthus tenellus*) 등이 6년간 평균 생물량 구성비 10%를 상회하는 주요종으로 나타났다. 특히 대조구인 대송리의 우점종들은 발전소 배수로의 경우와 큰 차이를 보였는데, 대조구에서 생물량 구성비가 높은 작은구슬산호말 (평균치 42%), 지층이 (17%), 참보라색우무 (*Symphyclocladia latiuscula*; 11%) 그리고 참서실 (=개서실 *Chondria crassicaulis*; 7%) 등은 배수로에서 거의 나타나지 않거나 매우 소량만 출현하였을 따름이다.

동해안에 세워진 3개 원자력발전소 가운데 본 조사가 이루어진 고리원자력발전소보다 약 55 km 북쪽에 위치한 월성 원자력발전소에서도 발전소의 취수로 또는 대조구와 비교하여 배수로의 생물량이 대체로 낮았고 생물량 구성비가 높은 종의 구성양식이 고리원자력발전소의 경우와 비슷한 것으로 조사된 바 있다 (김과 안 2005).

### 배수로 주변 해조군집의 30년간 변동 해석

국내 최초의 원자력발전소인 고리원자력발전소 주변 연안에서는 지난 30년간 다양한 해조군집 조사가 수행되었고, 이를 통하여 온배수의 방출이 해조류의 성장과 분포에 미치는 영향에 대해서 다각적으로 검토되었다. 여기서는 지난 30년간 고리원자력발전소 주변 해조군집의 정성·정량적 변동을 특히 배수로 주변의 해조류를 중심으로 추적하기로 한다.

고리원자력발전소 1호기가 상업운전을 시작하기 전인 1977년과 가동 직후인 1978년에 발전소 주변의 해조군집을 조사한 결과, 참도박(*Grateloupia elliptica*), 진두발(*Chondrus ocellatus*), 작은구슬산호말, 참서실, 애기우뭇가사리(*Gelidium divaricatum*) 등이 배수구에 인접한 정점에서 피도로 본 우점종으로 조사되었다(김과 이 1980). 이들 해조류 가운데 진두발의 피도치는 가동 전후에 큰 차이를 보이지 않았으나, 작은구슬산호말은 발전소 가동 이후 피도가 다소 증가한 반면 참도박은 피도가 오히려 감소하는 추세를 보였다. 그밖에 참서실은 1977년에만 관찰되었을 뿐 가동 이후에는 거의 관찰되지 않았고, 애기우뭇가사리는 오히려 가동 이후에 배수구에 인접한 정점에서 출현하는 독특함을 보였다.

한편 고리원자력발전소가 가동을 시작한 지 5년이 경과한 시점인 1983년에 발전소 주변의 5개 정점에서 계절별로 해조류 출현을 조사한 결과, 발전소로부터 각각 북동 및 남서방향으로 약 4 km에 위치한 신암리와 칠암리에서 공히 61종의 해조류가 관찰되었으나, 발전소의 3개 정점에서는 총 45종이 관찰된 바 있다(김 1986). 발전소의 3개 정점 가운데 취수구 부근에서는 42종이 관찰되었지만 배수구 부근에서는 연중 23종만이 관찰되었는데, 이는 발전소 가동 전후의 시점과 비교하여 현저하게 감소한 수준이다. 이와 같은 출현종의 감소는 1호기에서 방출되는 온배수의 영향뿐만 아니라, 인접한 2호기의 배수구 건설공사나 5·6호기의 부지 정지작업에 의한 해안 지형의 변화 또는 혼탁해진 연안 해수 등에 기인하는 것으로 추정되었다(김 1986).

특히 1983년에 고리원자력발전소 1호기 배수로에서는 연중 11종(녹조류 2종, 갈조류 2종 및 홍조류 7종)이 관찰되었는데, 이들 해조류 가운데 납작파래, 작은구슬산호말 그리고 붉은까막살(*Prionitis cornea*)은 연중 비교적 풍부하게 출현하였으며, 구멍갈파래(*Ulva pertusa*), 부챗살(*Ahnfeltiopsis flabelliformis*), 진두발 등도 연중 관찰되었다. 1977-1978년에 이루어진 해조류 조사는 배수구 부근의 정점에서 이루어졌으나, 1983년에 복수기를 통과한 냉각수가 주변 해수와 혼합하기 전인 배수로의 해조식생을 처음으로 밝혔다는 점이 특기할 만하다.

Abbott와 North(1971)는 미국 California주 연안에서 자연 수온이 상당 기간 20°C를 넘는 해역에 생육하는 해조류를 내열종(warm-tolerant species)으로 간주한 바 있다. 온대 지

방에 위치한 우리나라의 원자력발전소는 정상적으로 가동할 경우 대체로 20°C 이상의 냉각수가 주변으로 방출되며, 자연 수온이 높은 여름에는 30°C 이상의 온배수가 방출되고 있다. 따라서 발전소 배수로에 출현하는 해조류는 명백히 내열종으로 간주될 수 있으며, 1983년에 고리원자력발전소 1호기 배수로에 생육하는 것으로 관찰된 해조류 11종은 발전소 가동과 관련하여 국내에서 처음으로 보고된 내열종이라는 점에서 그 의의를 찾을 수 있다.

이어서 김 등(1992)은 1987년 4월부터 1989년 2월에 이르기까지 매일 발전소 주변 해조류를 조사하여 배수구에서의 거리가 가까울수록 식생이 빈약함을 밝혔고, 배수구에 가까울수록 종의 풍도와 다양도가 낮은 것으로 나타났다(김 1993; 김과 손 1993).

조사기간을 통하여 배수로에서는 구멍갈파래, 납작파래, 작은구슬산호말, 붉은까막살, 부챗살, 참치누아리(*Grateloupia filicina*), 진두발 등이 분포하고, 부챗말, 팽생이모자반, 큰잎모자반(*Sargassum coreanum*), 민산호말 무리(무절석회조류, melobesioidean algae) 등이 배수로 주변 조하대에 우점하는 것으로 보고하였다(김 등 1992). 한편 배수구 지역의 조간대 상부에는 남조류 예뽀이뽀족말(*Calothrix confervicola*), 링비아류(*Lyngbya* sp.), 흔들말류(*Oscillatoria* sp.) 등이 대표적으로 나타났다. 1987-1989년에 배수로에서 조사된 해조류 가운데 남조류를 제외한 모두가 이미 1983년의 조사에서 그 생육이 확인된 바 있어서(김 1986), 5년 내외의 기간에 걸쳐 고리원자력발전소 배수로의 해조식생은 거의 변화가 없었던 것으로 평가된다.

그런데 배수로에서는 유량의 변동에 따라 식생이 크게 좌우되는 것으로 나타났다(김 등 1992). 즉 1987년 봄에 유량이 1일 300톤 이상일 때에는 파래 무리(*Enteromorpha* spp.)의 생육이 증가하고 팽생이모자반도 1 m 크기의 개체로 서식하였다. 그러나 1988년 봄에 유량이 거의 없을 때에는 파래 군락이 형성되지 않고 무절석회조류만이 분포하였다. 또한 1989년 1월에 방출량이 회복되었을 때 모자반 무리의 재생산이 이루어지지 않았다.

한편 수온이 상승된 냉각수가 흐르는 배수로의 해조류 성장 양식은 온배수의 영향을 받지 않는 곳과 비교하여 차이를 보이는 것으로 밝혀졌다(김 등 1992). 이를테면 팽생이모자반은 대조구에서 5-6월에 배(embryo) 발생이 이루어져 방출된 후 7월에 쇠퇴하였으나, 배수로의 팽생이모자반은 이보다 이른 시기인 3월에 배가 형성되었으며 5월에 쇠퇴하기 시작하였다. 체장 변화에 있어서도 배수로에서는 1월에 최대 생장을 보인 반면 대조구에서는 4월에 최대가 되었으며, 대조구의 120 cm에 비해 배수로의 경우 체장이 100 cm로 작았다. 이와 같이 온배수의 영향을 받는 곳의 해조류 개체군이 온배수의 영향을 받지 않는 곳과 비교하여 비교형태학적 특성에

있어서 차이를 보이고 있음은 울진원자력발전소 주변에서 부챗살과 붉은까막살을 대상으로 수행한 연구에서도 확인된 바 있다(김과 최 1995).

이어서 김 등(1998)은 1992-1997년의 6년간 고리원자력발전소 배수로를 중심으로 내열종 해조류의 종조성과 생물량의 계절적 변화를 밝혔고, 김과 안(2005)은 1992-2000년의 9년간 고리원자력발전소를 포함하여 동해안의 3개 원자력발전소 배수로 해조류의 생태적 특성을 조사 비교하였다. 여기서는 특히 김과 안(2005)의 9년에 걸친 조사 결과를 중심으로 배수로 해조류의 정성·정량적 변동을 고찰하기로 한다.

고리원자력발전소 배수로에서 1992-2000년의 36회에 걸쳐 조사된 종조성 자료를 바탕으로 얻은 종수/출현횟수 곡선(species/occurrence curve)으로부터 모두 29종(남조류 4종, 녹조류 7종, 갈조류 7종, 홍조류 11종)의 해조류가 내열종 목록에 포함되었다(김과 안 2005). 물론 이들 가운데 상당수가 이전에 배수로에서 보편적으로 출현하는 종으로 보고된 바 있지만, 남조 1종(큰마디다발 *Microcoleus chthonoplastes*), 녹조류 5종(창자과래 *Enteromorpha intestinalis*, 잎과래 *E. linza*, 가시과래 *E. prolifera*, 모란갈과래 *Ulva conglobata*, 초록영킨실 *Derbesia marina*), 갈조류 3종(불레기말 *Colpomenia sinuosa*, 잔가시모자반 *Sargassum micracanthum*, 지층이 *S. thunbergii*), 그리고 홍조류 6종(애기우뭇가사리 *Gelidium divaricatum*, 잘피껍데기 *Pneophyllum zostericum*, 고리마디게발 *Amphiroa beauvoisii*, 참산호말 *Corallina officinalis*, 가는지누아리 *Grateloupia ramosissima*, 애기까시덤불 *Caulacanthus ustulatus*)의 15종은 1990년대에 배수로에서 새롭게 보편적으로 나타난 내열종으로 밝혀졌다.

이 가운데 녹조 초록영킨실은 그간 국내에서 제주도나 남해안 또는 독도에 분포하는 것으로 보고 되었는데(이와 강 2002) 동해 남부의 고리원자력발전소 배수로에도 분포하는 독특함을 보였고(김과 안 2005), 작은구슬산호말과 함께 마디산호말 무리(articulated coralline algae)에 속하는 고리마디게발이 1990년대에 배수로의 보편적 해조류로 자리매김하였다(김 등 1998). 한편 납작과래, 부챗말, 고리마디게발, 팽생이모자반, 붉은까막살, 가는지누아리 등이 생물량으로 본 우점종으로 나타나서 우점종 구성양식에 있어서도 1970-1980년대와는 다소 차이를 보였다(김과 안 2005). 특히 1990년대에 배수로 해조류의 생물량 가운데 상당 부분을 차지한 고리마디게발과 가는지누아리는 1970년대에 피도로 본 우점종이나 1980년대에 중요도로 본 우점종 목록에 포함되어 있지 않은 종들이었다. 반면 1980년대에 배수로의 주요종 가운데 하나로 나타났던 진두발(김 1986; 김 등 1992)은 1990년대에 단지 몇 계절에만 출현하였을 뿐이다.

이렇게 1990년대에 다소 변모된 배수로 해조식생은 2000년대에 접어들어 그 정성·정량적 특성이 다시 변화한 것으

로 나타났다. 즉 1992-2000년에 걸쳐 고리원자력발전소 배수로에서 나타난 내열종 29종(김과 안 2005) 가운데 녹조 1종(초록영킨실), 갈조류 2종(큰잎모자반, 잔가시모자반) 및 홍조류 3종(참산호말, 참지누아리, 참서실)의 6종은 최근 6년간 고리원자력발전소 배수로에서 출현하지 않는 독특함을 보였다(Table 1).

한편 Table 2에 보인 해조류 14종 가운데 녹조류 5종과 갈조류 2종을 포함하여 대부분의 종류가 고리원자력발전소 배수로에서 지난 1992-2000년에 걸쳐 수행된 종조성 조사에서도 모두 50% 이상의 출현 빈도를 보인 종들로 밝혀졌다(김과 안 2005). 그러나 최근 6년간 발전소 배수로에서 비교적 높은 출현 빈도를 보인 남조 1종(갈고리흔들말 *Oscillatoria brevis*)과 홍조류 2종(우뭇가사리, 가는지누아리)은 1992-2000년의 조사에서 30% 미만의 출현 빈도를 보인 종들이다. 반면에 1992-2000년에 50%의 출현 빈도를 보였던 홍조 붉은까막살은 24회에 걸친 이번 조사에서 단지 3회만 출현하였다.

따라서 지난 30년간 고리원자력발전소 배수로에서 조사된 조사 결과를 종합해 볼 때, 수온이 상승된 냉각수가 빠른 속도로 흐르는 발전소 배수로에는 자연 서식처와 다른 독특한 해조군집이 형성되어 있음을 확인할 수 있었다. 배수로에서 주로 출현하는 해조류들은 자연수온보다 높은 온도 환경과 단일방향성 해수 흐름에 적응하는 종들로 간주된다(Langford 1990; 김 등 1992, 1998). 다양한 해조류 가운데 특히 녹조류 과래 무리, 갈조류 팽생이모자반과 부챗말, 그리고 홍조류 붉은까막살과 고리마디게발 등이 고리원자력발전소 배수로의 대표적인 내열종으로 나타나고 있다.

그런데 지난 30년간의 배수로 해조류 종조성과 생물량 구성양식은 연차적으로 다소 변화를 보이는 것으로 파악되고 있는데, 이와 같은 현상에 대하여 김 등(1998, 2004)은 온배수가 흐르는 배수로에서도 해조군집의 특징적인 천이 현상이 진행되고 있는 것으로 해석한 바 있다. 이와 같이 배수로에서 일어나는 해조군집 천이 현상의 주된 원인은 발전소의 가동 여부와 관련이 있는 것으로 판단된다. 즉 고리원자력발전소와 같은 가압경수로(PWR) 원자로의 경우 사용 핵연료 교체에 위하여 정기적으로 수 주일간 가동을 정지하게 되고, 이 기간 동안에는 배수로에 냉각수가 흐르지 않는다. 따라서 일년 중 어느 시기에 가동이 중단되는 지에 따라 배수로에 이미 형성되었던 해조군집의 지속 여부와 새로운 군집의 형성 여부가 좌우되는 것으로 보인다.

한편 자연 수온이 높은 여름의 냉각수 온도 역시 가을 이후의 군집구조에 다소나마 영향을 미치는 것으로 간주되는데, 배수로에 분포하는 해조류 가운데 특히 다년생 또는 일년생 해조류들로 구성되는 갈조류나 홍조류들이 여름을 전후하여 수온이 높은 환경압박을 받으면서 그 생육이 사라지

는 반면, 다계절성 해조류인 녹조류들이나 높은 수온 환경에 적응하는 남조류들이 가을 이후에 출현하는 것으로 판단된다.

그밖에도 수온의 상승이 해조류 개체군 수준의 성장률과 성장주기에 영향을 미칠 수 있고(김과 최 1995), 초식동물에 의한 섭식 역시 배수로에서 무시할 수 없는 중요한 변수로 간주된다(Korpinen *et al.* 2007). 따라서 온배수가 주변 해조군집의 정성 정량적 측면에 미치는 영향에 관한 향후의 연구 조사에서는 이와 같은 다각적인 측면에 대한 면밀한 조사가 이루어져야 할 것으로 보인다.

## 사 사

이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었다. 논문을 심사하고 유익한 조언을 아끼지 않으신 편집위원장과 심사위원에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김영환. 1986. 고리원자력발전소 주변 해조류에 관한 연구 2. 1983년의 해조류 식생. 조류학회지 **1**: 241-249.
- 김영환. 1999. 원자력발전소의 건설과 가동이 저서 해조류에 미치는 영향. 한국환경생물학회지 **17**: 379-387.
- 김영환. 2000. 발전소 온배수와 해양생태계. 전파과학사, 서울.
- 김영환. 2003. 원자력발전과 온배수: 그 현황과 대책. 전파과학사, 서울.
- 김영환, 남기완, 손철현. 1997. 동해안 주문진 조간대의 저서 해조류: 해조상, 분포 및 군집구조. *Algae* **12**: 117-130.
- 김영환, 안중관. 2005. 동해안 3개 원전 배수로 해조군집의 특성. *Algae* **20**: 217-224.
- 김영환, 안중관. 2006. 동해안 월성원전의 온배수 방출이 주변 해조군집에 미치는 영향. *Algae* **21**: 453-461.
- 김영환, 안중관, 이재일, 엄희문. 2004. 동해안 울진원전의 온배수 방출이 주변 해조군집에 미치는 영향. *Algae* **19**: 257-270.
- 김영환, 엄희문, 강연식. 1998. 한국산 내열성 해조류의 정성·정량적 분석 1. 고리원자력발전소. *Algae* **13**: 213-226.
- 김영환, 윤현주, 유중수. 1995. 서해 중부 연안 해조군집의 종조성과 생물량. 식물학회지 **38**: 389-398.
- 김영환, 이정호. 1980. 고리원자력발전소 주변 해조류에 관한 연구 1. 1977-1978년의 해조군집의 변화. 식물학회지 **23**: 3-10.
- 김영환, 최상일. 1995. 발전소 냉각계통이 해조 식생에 미치는 영향. 조류학회지 **10**: 121-141.
- 김영환, 허성희. 1998. 서해안 영광원자력발전소 주변 해조군집의 종조성과 생물량. 한국수산학회지 **31**: 150-161.
- 김형근. 1993. 고리원자력발전소 연안 해조군집의 종조성과 계절변화. 강릉대학교 동해안연구 **4**: 12-19.
- 김형근, 강래선, 손철현. 1992. 고리 원자력발전소 연안의 해조군집에 대한 온배수의 영향. 조류학회지 **7**: 269-279.
- 김형근, 손철현. 1993. 온배수 지역 조간대 해조군집의 종 다양도. 강릉대학교 동해안연구 **4**: 20-26.
- 김홍기, 김영환. 1991. 한국 3개 원자력발전소 주변 해조군집. 조류학회지 **6**: 157-192.
- 이용필, 강서영. 2002. 한국산 해조류의 목록. 제주대학교 출판부, 제주.
- 이인규, 강제원. 1986. 한국산 해조류의 목록. 조류학회지 **1**: 311-325.
- Abbott I.A. and North W.J. 1971. Temperature influences on floral composition in California coastal waters. *Proc. Intl. Seaweed Symp.* **7**: 72-79.
- Esch G.W. and McFarlane R.W. 1976. *Thermal Ecology II*. Technical Information Center, Energy Research and Development Administration, Springfield.
- Gibbons J.W. and Sharitz R.R. 1974. *Thermal Ecology*. Technical Information Center, U.S. Atomic Energy Commission.
- Glasstone S. and Jordan W.H. 1980. *Nuclear power and its environmental effects*. American Nuclear Society, III.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). 1974. *Thermal discharges at nuclear power stations: their management and environmental impacts*. Technical Rep. Ser. No. 155, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Keser M., Swenarton J.T. and Foertch J.F. 2005. Effects of thermal input and climate change on growth of *Ascophyllum nodosum* (Fucales, Phaeophyceae) in eastern Long Island Sound (USA). *Journal of Sea Research* **54**: 211-220.
- Korpinen S., Jormalainen V. and Honkanen T. 2007. Effects of nutrients, herbivory and depth on the macroalgal community in the rocky sublittoral. *Ecology* **88**: 839-852.
- Langford T.E.L. 1990. *Ecological effects of thermal discharges*. Elsevier Appl. Sci., London.
- Lee J.W., Kim Y.H. and Lee H.B. 2001. The community structure of intertidal marine benthic algae in the east coast of Korea II. Sokcho. *Algae* **16**: 113-118.
- Schiel D.R., Steinbeck J.R. and Foster M.S. 2004. Ten years of induced ocean warming causes comprehensive changes in marine benthic communities. *Ecology* **85**: 1833-1839.
- Steinbeck J.R., Schiel D.R. and Foster M.S. 2005. Detecting long-term change in complex communities: A case study from the rocky intertidal zone. *Ecological Applications* **15**: 1813-1832.
- Yoshida T., Yoshinaga K. and Nakajima Y. 1995. Check list of marine algae of Japan (revised in 1995). *Jpn. J. Phycol.* **43**: 115-171.

Received November 11 2007

Accepted December 3 2007