

동해안 3개 원전 배수로 해조군집의 생태적 특성

김영환* · 안중관

(충북대학교 생명과학부)

Ecological Characteristics of Marine Algal Communities at the Discharge Canals of Three Nuclear Power Plants on the East Coast of Korea

Young Hwan Kim* and Jung Kwan Ahn

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

The species composition and biomass of marine algae at the discharge canals of three (Gori, Wolseong and Uljin) nuclear power plants on the east coast of Korea were investigated seasonally from February 1992 to October 2000. As a result, 103-107 species of marine algae were found at the discharge canals during the past nine years. In general, algal communities established at the discharge canals were less diverse than those at the intake canals and control sites. 43 species (6 blue-green, 9 green, 10 brown and 18 red algae) of marine algae occurred more than 1/6 frequency and thus can be categorized as warm tolerant species. Among these, two green (*Urospora penicilliformis*, *Cladophora albida*), four brown (*Sphacelaria divaricata*, *S. rigidula*, *Sargassum coreanum*, *S. fulvellum*) and four red algae (*Stylonema alsidii*, *Bangia atropurpurea*, *Hypnea charoides*, *Chondria crassicaulis*) are recorded as warm tolerant marine algae for the first time in Korea during this study. *Enteromorpha compressa*, *Padina arborescens*, *Amphiroa zonata* and *Ahnfeltiopsis flabelliformis* were common species found more than 50% frequency at the discharge canals of all three nuclear power plants investigated. Dominant species in biomass were *Padina arborescens* and *Amphiroa zonata*. Results showed that, as a whole, the red algae appeared as predominant algal group at the discharge canals of all three nuclear power plants on the east coast of Korea. However, the biomass proportion of dominant algae at the discharge canals of each nuclear power plant varied over the year during the past nine years.

Key Words: discharge canal, Gori, marine algae, nuclear power plant, Uljin, warm tolerant species, Wolseong

서 론

지구온난화의 규제 및 방지를 위한 국제협약인 기후변화 협약의 구체적 이행 방안으로 1997년 교토의정서가 채택된 이래, 석유나 기름을 연소시키는 과정에서 대량의 온실가스를 방출하는 화력발전 대신 원자력발전의 역할이 강조되고 있음은 주지의 사실이다. 그러나 38-39%의 열효율을 갖춘 화력발전에 비하여 원자력발전은 열효율이 33-34% 가량으로 낮은 탓에 훨씬 많은 양의 냉각수가 소요되고(IAEA 1974; Glasstone and Jordan 1980), 이에 따라 필연적으로 주변 수역에 미치는 열생태학적 영향이 가중될 수밖에 없다

(Langford 1990; 김 2000).

고착성 해조류의 분포를 결정짓는 가장 중요한 환경요인은 해수의 온도이며(Gessner 1970; van den Hoek 1982a, b), 이미 다양한 연구를 통하여 온도와 해조류 분포의 상관성이 보고되었다. 이를테면 위도에 따른 저서성 해조군집의 종조성 변화는 해수 온도와 상관 관계를 갖고(Murray and Littler 1981; Bolton and Anderson 1990), 중별 지리적 경계의 원인을 실험실적 배양 결과에서 찾을 수 있다(Pakker *et al.* 1994, 1995). 나아가서 저서 해조류는 고착하여 생육하는 특징 때문에 온배수의 영향을 평가할 수 있는 유용한 지표생물로 간주되고 있다(North 1969; Abbott and North 1971; Blake *et al.* 1976; Vadas *et al.* 1976).

우리나라 연안에 세워진 원자력발전소 주변의 해조류 분포는 김과 이(1980)가 국내에서 처음으로 건설된 고리원자력

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

발전소 주변을 대상으로 해조군집의 변화를 밝힌 이래 비교적 다양한 자료가 축적되었다(Kim and Lee 1981; 김 1986, 1999; 김과 김 1991; 김과 유 1992; 김과 최 1995; 김과 허 1998). 특히 원자력발전소 배수로와 같이 자연수온보다 높은 온도조건에 형성되는 해조군집의 독특한 특성과 관련하여 내열종 해조류의 규모와 생물량 변동이 밝혀지고(김 1986; 김 등 1992, 1998, 2004), 기능형군별 특성이 비교되고(황 등 1996), 해조류 개체군의 생장률과 생장주기의 차이가 파악되는 등(김과 최 1995), 나름대로 몇 가지 학술적으로 중요한 성과가 얻어졌다고 평가된다.

그런데 2002년에 영광원전 5·6호기가 가동되고, 울진원전 5호기와 6호기가 각각 2004년과 2005년에 상업운전을 시작하였다. 더구나 울산시 울주군에는 신고리원전 1-4호기가 건설되고 있고, 경북 경주시에는 신월성원전 1-2호기가 건설되는 등 발전소의 건설과 가동은 21세기에 들어서도 계속되고 있는 실정이다. 따라서 원자력발전소라는 거대한 인공구조물의 출현과 발전소의 가동 이후 주변 해역으로 다량 방출되는 온배수에 의한 저서 해조류의 영향을 종합적으로 이해하기 위한 다각적인 연구의 필요성이 제기되고 있다.

본 연구는 이러한 배경 아래 동해안에 건설된 3개 원자력발전소를 대상으로 수온이 상승된 냉각수가 흐르는 배수로에 형성된 해조군집의 정성·정량적 특성을 파악하고 주변의 해조군집과 비교하여 그 생태적인 특성을 구명하기 위하여 시도되었다. 부착 해조류가 원자력발전의 가동에 따른 온배수의 환경영향 평가에 귀중한 지표생물로 활용되고 있음을 고려해 볼 때, 발전소 배수로라는 독특한 환경에 형성된 해조군집의 생태적 특성 구명은 열생태학적 측면에서 귀중한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다(Roessler 1971; 김과 최 1995; 김 2000).

조사지 개황

본 연구가 수행된 3개 원자력발전소의 위치는 Fig. 1에 보인 바와 같다. 먼저 부산시 기장군에 위치한 고리원자력발전소는 가압경수로형 원자로이면서 관류냉각방식(once-through cooling system)을 채택하고 있다. 발전소가 정상적으로 가동할 때 방출되는 냉각수는 각각 1호기 21.8 m³sec⁻¹, 2호기 23.7 m³sec⁻¹, 3호기 42.8 m³sec⁻¹, 그리고 4호기 43.3 m³sec⁻¹이다(김 2003). 발전소 1호기와 2호기의 취수구가 부지의 서쪽에, 그리고 3호기와 4호기의 취수구는 부지의 동쪽에 위치하고 있다. 배수로는 호기별로 별도로 설치되어 있으며, 이들 모두 부지의 남쪽을 향하고 있다. 본 연구는 그 가운데 1호기 배수로에서 수행되었다(Fig. 1C).

경북 경주시에 위치한 월성원자력발전소는 다른 원자력발전소와 달리 가압중수로형 원자로이면서 관류냉각방식을 취

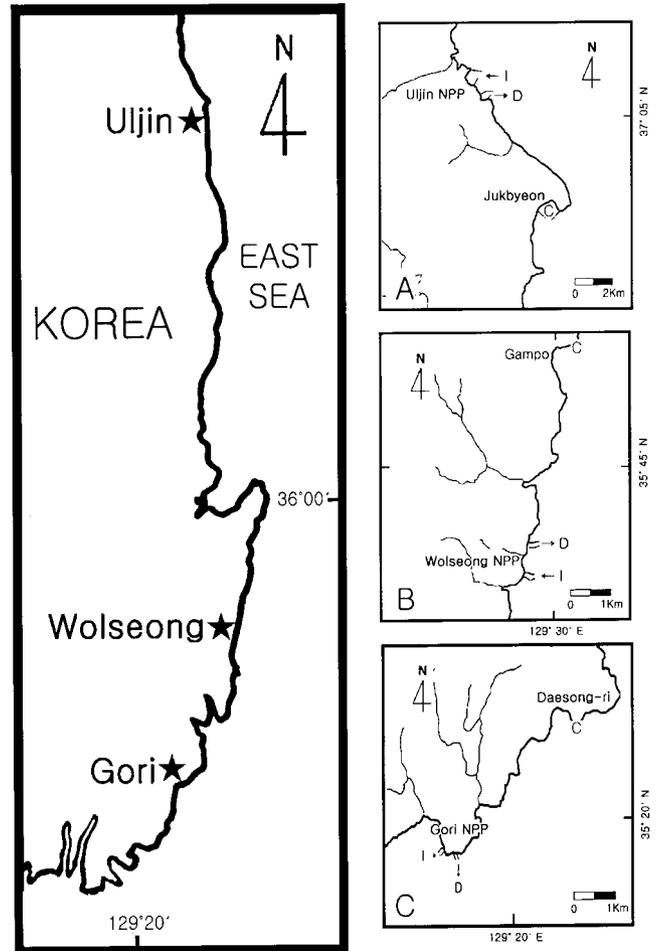


Fig. 1. A map showing the sampling sites of Uljin (A), Wolsong (B) and Gori (C) nuclear power plants. I, intake; D, discharge canal; C, control site.

하고 있다. 고리원자력발전소의 경우와 달리 월성원자력발전소의 4개 호기는 공동의 취수로와 배수로를 이용하게끔 설계되었으며(Fig. 1B), 냉각수 방출량은 4개 호기 공히 40.5 m³sec⁻¹이다.

동해안의 3개 원자력발전소 가운데 가장 북쪽의 경북 울진군에 위치하고 있는 울진원자력발전소는 고리원자력발전소와 마찬가지로 가압경수로형 원자로이면서 관류냉각방식을 취하고 있다. 냉각수가 흐르는 취수로와 배수로는 월성원자력발전소의 경우와 마찬가지로 발전소 4개 호기가 합동으로 설치되어 있으며(Fig. 1A), 냉각수 방출량은 1-2호기가 각각 61.8 m³sec⁻¹이고, 3-4호기가 각각 49.8 m³sec⁻¹이다.

이들 3개 원자력발전소가 정상적으로 가동할 경우 복수기(condenser)의 입·출구 온도차(ΔT)는 계절별로 6-11°C의 범위를 보이고 있으며(Fig. 2), 그 평균 ΔT는 약 9°C이다(한국전력공사 1993-2001). 그렇지만 복수기를 통과한 다음 냉각수의 온도는 차츰 감소하여 주변 해수와 혼합되기 전에 배수로를 흐르는 냉각수의 온도는 주변의 자연해수보다 2-4°C 가량 높다.

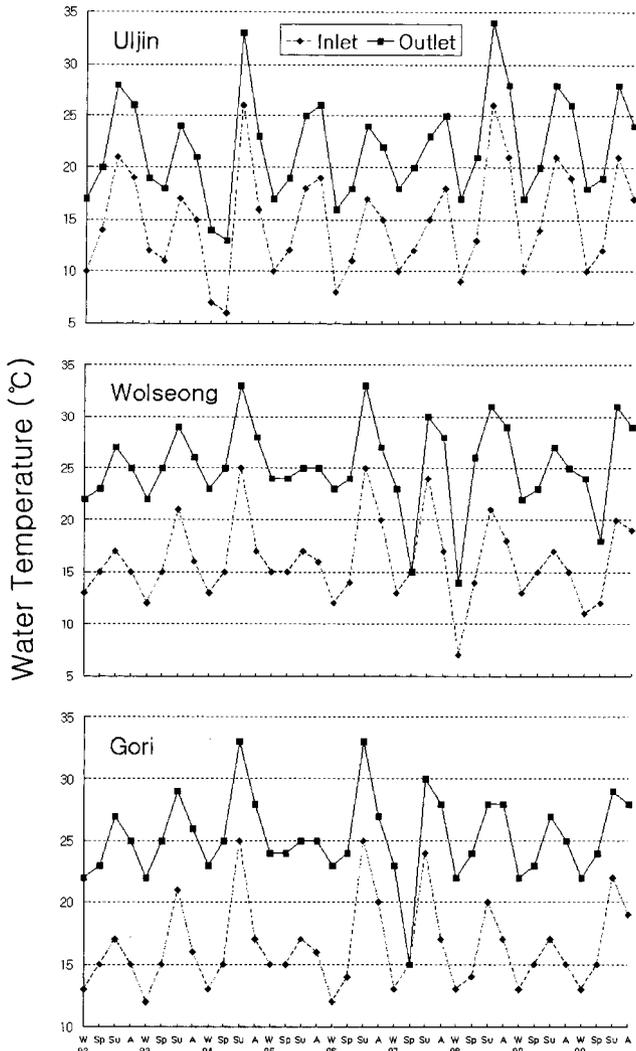


Fig. 2. Comparisons of water temperatures measured at the inlet and outlet of the condenser of three nuclear power plants on the east coast of Korea during 1992-2000.

한편 이 연구가 수행된 동해안의 3개 원자력발전소 주변의 환경 요인 변화는 김 등(2004)에 의하여 정리된 바 있다.

재료와 방법

1992년 2월부터 2000년 10월에 이르기까지 9년간 계절별로 동해안 3개 원자력발전소(고리, 월성 및 울진)의 배수로(Fig. 1의 정점 D)에서 해조류의 종조성과 생물량을 조사하였다. 아울러 발전소 배수로에 출현하는 해조류의 정성·정량적 특성을 파악할 목적으로 냉각수가 유입되는 취수로(Fig. 1의 정점 I)와 온배수의 영향을 받지 않을 것으로 판단되는 지점을 대조구(Fig. 1의 정점 C)로 지정하고 동일한 내용의 조사를 실시하여 그 결과를 비교 검토하였다.

해조류의 종조성 조사

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

채집된 재료는 현장에서 10% 포르말린-해수 용액으로 고정시켜 실험실로 운반하여 검경 동정하였다. 동정된 해조류의 학명과 목록 정리는 Yoshida 등(1995)에 따랐고, 해조류의 국명은 이와 강(1986, 2002)에 따랐다. 한편 36회에 걸쳐 배수로에서 출현한 해조류 가운데 내열종 해조류를 판정하는 기준은 김 등(2004)의 방법을 이용하였다.

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(m²)당 무게로 환산하고, 해조류 종류별 생물량 평균치와 단위면적당 현존량 구성비(%)를 구하였다(김 등 1995, 1997).

결과 및 고찰

배수로 해조류의 정성적 특성 비교

동해안의 3개 원자력발전소를 대상으로 수행된 이번 조사를 통하여 1992-2000년에 걸쳐 고리원자력발전소 배수로에서는 총 103종(남조류 11종, 녹조류 16종, 갈조류 23종 및 홍조류 53종), 월성 배수로에서 총 107종(남조류 11종, 녹조류 21종, 갈조류 20종 및 홍조류 55종), 그리고 울진 배수로에서 총 107종(남조류 13종, 녹조류 12종, 갈조류 22종 및 홍조류 60종)의 해조류가 관찰되었다.

배수로에서 출현한 해조류의 문별 구성비율을 발전소별로 비교해 볼 때, 남조류는 10-12% 그리고 갈조류는 19-22%의 범위로 나타나서 발전소간에서 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 녹조류의 구성비는 울진에서 11%로 적은 반면에 월성에서 20%로 다소 높게 나타나서 차이를 보였으며, 홍조류의 구성비는 고리와 월성에서 공히 51%인 반면 울진에서는 이

Table 1. Comparison of total mean number of algal species found at the discharge canal, the intake and the reference site of three nuclear power plants on the east coast of Korea during 1992-2000

Site	Gori	Wolseong	Uljin
Discharge	17	17	15
Intake	28	28	30
Reference	36	49	50

보다 다소 높은 56%의 구성비율을 보였다.

9년간 계절별로 36회에 걸쳐 각 발전소의 배수로와 취수로 그리고 대조구에서 조사된 해조류의 조사시기별 평균 출현종수를 살펴보면 Table 1과 같다. 이 표에 나타난 바와 같이 발전소의 복수기를 통과하여 수온이 상승된 냉각수가 흐르는 배수로에서는 냉각수가 유입되는 취수로 또는 대조구에 비하여 전반적으로 출현종수가 적은 것으로 밝혀졌다.

그런데 발전소의 배수로에서 관찰된 해조류의 조사시기별 평균 출현종수와 취수로나 대조구에서 출현한 해조류의 평균 출현종수의 비는 위도가 낮은 고리원자력발전소에서 북쪽의 울진원자력발전소로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다.

먼저 고리원자력발전소의 경우, 배수로의 해조류 평균 출현종수는 취수로의 평균 출현종수에 비하여 61%에 해당하였으며, 특히 대조구와 비교하면 절반에도 못 미치는 47%에 불과하였다. 이와 같은 경향은 위도가 높은 울진원자력발전소의 경우 더욱 뚜렷하게 나타나고 있는데, 온배수가 흐르는 배수로의 해조류 평균 출현종수는 취수로의 절반에 불과하고 대조구의 해조류 평균 출현종수와 비교하면 30%에 불과하다.

3개 원자력발전소 배수로에서 각각 36회에 걸쳐 조사된 종 조성 자료를 바탕으로 얻은 종수/출현횟수 곡선(species/occurrence curve)으로부터 김 등(2004)의 방법에 따라 내열종을 판정한 결과, 기준이 되는 조사횟수는 3개 발전소 모두에서 6회로 나타났다. 따라서 3개 원자력발전소 배수로에서 관찰된 해조류 가운데 6회 이상 출현한 종을 내열종으로 판정하였으며, 1992-2000년에 걸쳐 동해안의 3개 원자력발전소에서 조사된 내열종 해조류를 정리한 결과는 Table 2와 같다.

3개 원자력발전소에서 나타난 내열종 해조류는 총 43종(남조류 6종, 녹조류 9종, 갈조류 10종, 홍조류 18종)이다. 이 가운데 3개 원자력발전소의 배수로 모두에서 공통적으로 출현한 종은 남조류 3종, 녹조류 5종, 갈조류 5종, 그리고 홍조류 7종으로 모두 20종이었으며, 단지 한 군데 발전소에서만 출현한 내열종은 고리에서 4종, 월성에서 9종 그리고 울진원자력발전소에서 5종이었다.

Table 2에 정리된 내열종 해조류 가운데 절반에 해당하는 21종은 이미 김(1986)과 김 등(1998)에 의하여 고리원자력발

Table 2. A list of warm-tolerant marine algae occurring at the discharge canals of the three nuclear power plants investigated on the east coast of Korea during 1992-2000

Species	Gori	Wolseong	Uljin
Cyanophyta			
<i>Lyngbya aestuarii</i>		+	
<i>L. confervoides</i>		+	
<i>L. lutea</i>	+		+
<i>Microcoleus chthonoplastes</i>	+	+	+
<i>Oscillatoria brevis</i>	+	+	+
<i>O. nigro-viridis</i>	+	+	+
Chlorophyta			
<i>Enteromorpha compressa</i>	+	+	+
<i>E. intestinalis</i>	+	+	+
<i>E. linza</i>	+	+	+
<i>E. prolifera</i>	+	+	+
<i>Ulva conglobata</i>	+	+	
<i>U. pertusa</i>	+	+	+
<i>Urospora penicilliformis</i>		+	
<i>Cladophora albida</i>		+	
<i>Derbesia marina</i>	+		
Phaeophyta			
<i>Ectocarpus arctus</i>	+	+	+
<i>Colpomenia sinuosa</i>	+	+	+
<i>Sphacelaria divaricata</i>		+	
<i>S. rigidula</i>		+	
<i>Dictyota dichotoma</i>			+
<i>Padina arborescens</i>	+	+	+
<i>Sargassum coreanum</i>	+		
<i>S. fulvellum</i>	+	+	
<i>S. horneri</i>	+	+	+
<i>S. micracanthum</i>	+	+	+
Rhodophyta			
<i>Stylonema alsidii</i>		+	
<i>Bangia atropurpurea</i>		+	
<i>Gelidium amansii</i>			+
<i>G. divaricatum</i>	+	+	+
<i>Amphiroa ephedraea</i>			+
<i>A. zonata</i>	+	+	+
<i>Corallina officinalis</i>	+		+
<i>C. pilulifera</i>	+	+	+
<i>Hydrolythion sargassi</i>			+
<i>Marginisporum crassissimum</i>			+
<i>Pneophyllum zostericum</i>	+	+	+
<i>Grateloupia filicina</i>	+	+	
<i>Prionitis cornea</i>	+	+	+
<i>P. ramosissima</i>	+		
<i>Caulacanthus usutulatus</i>	+	+	+
<i>Hypnea charoides</i>		+	
<i>Ahnfeltiopsis flabelliformis</i>	+	+	+
<i>Chondria crassicaulis</i>	+		

전소 배수로에서 내열종으로 보고된 바 있다. 그밖에 링비아 무리(*Lyngbya* spp.)와 흔들말 무리(*Oscillatoria* spp.) 등의 남

Table 3. Common species at the discharge canals of three nuclear power plants and their frequencies (%) of appearance for each power plants

Species	Gori	Wolseong	Uljin
Chlorophyta			
<i>Enteromorpha compressa</i>	83	89	67
<i>E. intestinalis</i>	78	31	17
<i>E. linza</i>	67	69	19
<i>E. prolifera</i>	67	89	42
<i>Ulva pertusa</i>	69	67	39
Phaeophyta			
<i>Ectocarpus arctus</i>	17	50	25
<i>Colpomenia sinuosa</i>	22	25	67
<i>Dictyota dichotoma</i>	3	8	58
<i>Padina arborescens</i>	75	86	86
<i>Sargassum horneri</i>	64	47	39
<i>S. micracanthum</i>	19	19	56
Rhodophyta			
<i>Amphiroa zonata</i>	75	58	86
<i>Corallina officinalis</i>	31	14	53
<i>C. pilulifera</i>	64	47	78
<i>Pneophyllum zostericum</i>	39	31	61
<i>Prionitis cornea</i>	50	25	19
<i>Caulacanthus usutulatus</i>	53	81	42
<i>Ahnfeltiopsis flabelliformis</i>	61	75	56

조류와 민산호말 무리(무질석회조류, melobesioidean algae) 역시 고리원자력발전소 배수로에서 보편적으로 출현한다고 보고된 바 있다(김 등 1992). 한편 김 등(2004)은 울진원자력발전소를 대상으로 갈조류 1종(참그물바탕말 *Dictyota dichotoma*)과 홍조류 4종(우뭇가사리 *Gelidium amansii*, 에페드라게말 *Amphiroa ephedraea*, 모자반겉데기 *Hydrolithon sargassi*, 둘레게말혹 *Marginisporum crassissimum*)을 추가로 내열종 목록에 포함시킨 바 있다.

따라서 이를 감안하더라도 이번 조사를 통하여 동해안의 3개 원자력발전소 배수로에서 조사된 해조류 가운데 녹조류 2종(초록털말 *Urospora penicilliformis*, 숨대마디말 *Cladophora albida*), 갈조류 4종(갈래갯쇠털 *Sphacelaria divaricata*, 가위갯쇠털 *S. rigidula*, 모자반 *Sargassum fulvellum*, 큰잎모자반 *S. coreanum* = *S. ringgoldianum*) 그리고 홍조류 4종(마디털 *Stylonema alsidii*, 김과래 *Bangia atropurpurea*, 참가사리우무 *Hypnea charoides*, 개서실 *Chondria crassicaulis*)의 10종은 한국산 내열종 해조류로 새롭게 추가될 수 있을 것이다.

Table 2에 정리된 바와 같은 내열종 해조류들은 한국산 해조류의 지리적 분포나 특히 종별 생육한계를 구명하는데 있어서 몇 가지 흥미로운 정보를 제공해 준다. 이를테면 녹조 초록영킨실(*Derbesia marina*)은 그간 국내에서 제주도나 남해안 그리고 울릉도와 독도에 분포하는 것으로 보고되었는데(이와 강 2002), 김 등(1998)에 이어 동해 남부의 고리원자력

Table 4. Comparison of total mean biomass values of marine algae found at the discharge canal, the intake and the reference site of three nuclear power plants on the east coast of Korea during 1992-2000

Site	(unit: g dry wt · m ⁻²)		
	Gori	Wolseong	Uljin
Discharge	115.03	127.32	391.22
Intake	181.72	301.23	331.20
Reference	475.63	305.14	588.52

발전소 배수로에 출현하고 있음을 재확인하였다. 그밖에 갈조 부채말(*Padina arborescens*) 역시 그 분포역이 주로 제주도 와 남해안으로 보고되었지만(이와 강 2002), 동해안의 3개 원자력발전소 배수로에서 공통적으로 출현하는 것으로 밝혀졌다.

한편 이번 조사를 통하여 발전소 배수로에서 밝혀진 해조류 가운데 보편적으로 출현한 내열종의 출현 빈도를 비교한 결과는 Table 3과 같다.

동해안에 위치한 3개 원자력발전소의 배수로 모두에서 50% 이상의 출현 빈도를 보인 종은 녹조 납작과래(*Enteromorpha compressa*), 갈조 부채말 그리고 홍조류 고리마디게말(*Amphiroa zonata*)과 부채살(*Ahnfeltiopsis flabelliformis*)의 4종이었다. 이들 4종은 고리원전(김 등 1998)이나 울진원전(김 등 2004)은 물론 월성원전 배수로에서도 보편적으로 출현하는 우리나라의 대표적인 내열종 해조류로 간주된다.

그밖에 창자과래(*Enteromorpha intestinalis*), 팽생이모자반(*Sargassum horneri*), 붉은까막살(*Prionitis cornea*) 등은 위도가 낮은 고리원자력발전소에서 상대적으로 높은 출현 빈도를 보인 반면, 불레기말(*Colpomenia sinuosa*), 참그물바탕말, 잔가시모자반(*Sargassum micracanthum*), 참산호말(*Corallina officinalis*) 등은 북쪽의 울진원자력발전소에서 높은 출현 빈도를 보이면서 대조를 이루었다.

배수로 해조류의 정량적 특성 비교

1992-2000년에 이르기까지 동해안의 3개 원자력발전소를 대상으로 수행된 이번 조사를 통하여 각 발전소의 배수로와 취수로 그리고 대조구에서 조사된 해조류의 조사시기별 평균 생물량 조사결과를 비교하면 Table 4와 같다.

이 표에 나타난 바와 같이 복수기를 통과하여 수온이 상승된 냉각수가 흐르는 발전소 배수로에서는 냉각수가 유입되는 취수로 또는 온배수의 영향을 받지 않을 것으로 간주되는 대조구와 비교하여 대체로 생물량이 적은 추세를 보였다. 특히 월성원자력발전소의 경우에는 배수로 해조류의 조사시기별 평균 생물량이 취수로나 대조구의 절반에도 못 미치는 적은 양을 보이고 있음을 알 수 있다.

그렇지만 울진원자력발전소의 경우는 예외적으로 취수로

Table 5. Major species at the discharge canals of the three nuclear power plants investigated and their contribution (%) to a total biomass proportion for each power plant

Species	Gori	Wolseong	Uljin
Chlorophyta			
<i>Enteromorpha compressa</i>	16	18	-
<i>Ulva conglobata</i>	2	-	-
<i>U. pertusa</i>	6	4	-
<i>Cladophora albida</i>	-	2	-
Phaeophyta			
<i>Colpomenia sinuosa</i>	1	1	2
<i>Dictyota dichotoma</i>	-	-	5
<i>Padina arborescens</i>	14	26	18
<i>Sargassum fulvellum</i>	2	2	-
<i>S. horneri</i>	9	5	-
<i>S. micracanthum</i>	-	-	11
<i>S. patens</i>	-	-	2
Rhodophyta			
<i>Gelidium amansii</i>	2	-	-
<i>G. divaricatum</i>	-	4	2
<i>Pterocladia capillacea</i>	3	-	-
<i>Amphiroa zonata</i>	11	6	23
<i>Corallina pilulifera</i>	3	1	34
<i>Grateloupia filicina</i>	1	2	-
<i>G. sparsa</i>	-	3	-
<i>Prionitis cornea</i>	9	-	1
<i>P. ramosissima</i>	8	2	-
<i>Caulacanthus usutulatus</i>	1	15	-
<i>Chondracanthus intermedius</i>	1	-	-
<i>Ahnfeltiopsis flabelliformis</i>	4	7	1
<i>Chondria crassicaulis</i>	4	-	-

보다 배수로에서 평균 생물량이 많았는데, 이는 냉각수가 흐르는 배수로에 작은구슬산호말이나 고리마디게발 등 산호말 무리가 번무하고 있기 때문으로 간주된다.

한편 이번 조사를 통하여 발전소 배수로에서 밝혀진 해조류 가운데 생물량으로 본 우점종의 생물량 구성비를 비교한 결과는 Table 5와 같다.

이들 해조류 가운데 갈조 부챗말과 홍조 고리마디게발은 동해안에 위치한 3개 원자력발전소의 배수로 모두에서 생물량 기여도가 높은 우점종으로 나타났으며, 이들은 출현 빈도로 본 보편종 목록에서도 높은 빈도를 보이는 종들이다 (Table 3).

그밖에 작은구슬산호말, 납작파래, 애기가시덤불, 팽생이모자반 등도 생물량 구성비가 높은 우점종으로 나타났는데, 이 가운데 작은구슬산호말은 주로 울진원자력발전소에서 높은 구성비를 보인 반면, 납작파래와 팽생이모자반은 고리원자력발전소와 월성원자력발전소에서, 그리고 애기가시덤불은 월성원자력발전소에서 구성비가 높았다.

조사시기별로 각 발전소 배수로에서 조사된 해조류 생물

Table 6. Comparison of sum of seasonal biomass proportion of marine algae found at the discharge canals of three nuclear power plants during 1992-2000; values in parentheses are the contribution of each division

Division	Gori	Wolseong	Uljin
Chlorophyta	873% (24%)	846% (23%)	41% (1%)
Phaeophyta	932% (26%)	1,316% (37%)	1,270% (37%)
Rhodophyta	1,795% (50%)	1,438% (40%)	2,089% (62%)
Total	3,600% (100%)	3,600% (100%)	3,400% (100%)

량의 문별 구성비율 합계는 Table 6에 나타난 바와 같다. 여기서 고리 및 월성원자력발전소에서는 9년간 계절별로 36회에 걸쳐 모두 조사되었기 때문에 그 합계가 3,600%이지만, 울진원자력발전소의 경우 1994년 여름의 높은 수온으로 말미암아 1994년 가을과 1995년 겨울의 두 차례에 걸쳐 배수로에서 전혀 해조식생을 관찰하지 못하였기 때문에 생물량의 문별 구성비율 합계가 3,400%로 계산되었다(김 등 2004).

Table 6에 나타난 바와 같이 생물량의 구성비율에 있어 홍조류는 동해안의 3개 원자력발전소 배수로 모두에서 가장 중요한 조류집단으로 밝혀졌으며, 9년간 평균 구성비율은 월성의 40%에서 울진의 62%에 이르고 있다. 갈조류 역시 발전소 배수로의 중요한 집단임을 알 수 있는데, 고리에서는 9년간 평균 26%로 나타났지만 월성과 울진에서는 공히 37%에 달하고 있다. 그런데 녹조류의 경우, 고리와 월성에서는 각각 24%와 23%의 비교적 높은 구성비율을 보인 반면, 울진 원자력발전소 배수로에서는 지난 9년간 단지 1%의 매우 적은 구성비율을 보인 점이 특기할만하다.

물론 이 자료는 온배수가 흐르는 발전소 배수로에 국한된 자료이기는 하지만, 온배수의 영향을 거의 받지 않거나 전혀 받지 않을 것으로 간주되는 울진원전의 취수구 주변과 대조구에서도 녹조류의 생물량 구성비율이 매우 적은 것으로 조사되었다(한국전력공사 1993-2001). 이는 일반적으로 갈조류가 수온이 낮은 해역에 많은 반면 녹조류가 열대나 난해에 많다는 분포적 특성을 반영하는 것으로(강 1968), 울진원전이 위치한 동해안 중부에서 조사 보고된 해조류 생물량 자료들에서도 이와 같은 추세를 확인할 수 있다.

즉 1990년에 계절별로 울진원전 부근의 장호에서 유기물량으로 조사한 해조류 현존량 조사 결과 녹조류는 계절별로 3-11%의 구성비율을 보였는데(이 1991), 그나마 장호에서 출현한 녹조류들은 발전소 배수로에서는 나타나지 않는 떡청각(*Codium arabicum* = *C. adhaerens*)과 염주말(*Chaetomorpha moniligera*)이 대부분을 차지하였다. 한편 울진원전에서 북서쪽으로 약 100 km에 위치한 강원도 주문진에서 1995년 여름부터 1996년 봄에 걸쳐 계절별로 조간대 해조류의 생물량을 조사한 김 등(1997)의 자료에 따르면 가을과 겨울에는 구멍

갈파래, 납작파래, 잎파래 (*Enteromorpha linza*) 등이 출현하면서 생물량 구성비율 가운데 녹조류가 차지하는 비율이 5-6%이었지만, 봄에는 단지 0.5% 그리고 여름에는 0.2%에 불과하였다.

온배수의 유입이 이루어지는 수역에 형성되는 해조군집은 대체로 종조성과 생물량이 감소하고 남조류와 녹조류가 번무하는 특징을 보이고 있다(Patrick 1974; Langford 1990; 김 2000). 한국 동해안에 위치한 3개 원자력발전소를 대상으로 수행된 이번 조사 결과, 발전소 배수로에서는 주변의 해조군집과 비교해 볼 때 출현종수가 적었고(Table 1) 생물량 또한 대체로 적게 나타났다(Table 4). 한편 배수로 해조류의 생물량 구성비율에 있어서 고리와 월성원자력발전소에서는 녹조류가 23-24%의 비교적 높은 구성비율을 보였다(Table 6). 다만 울진원전의 경우는 배수로에서 녹조류가 차지하는 비율이 매우 적었지만, 이는 앞서 논의한 바와 같이 수온이 다소 낮은 수역에서 나타나는 자연적인 현상에 따른 것으로 해석된다.

그런데 1992-2000년에 걸친 이번 조사를 통하여 동해안의 3개 원자력발전소 배수로에서 11-13종의 남조류가 관찰되었고, 발전소별 내열종 목록에도 남조류가 6종 포함되어 있기는 하지만(Table 2), 지난 9년간 3개 원자력발전소 모두에서 생물량을 측정할만한 남조류는 거의 발견할 수 없었다(Table 6). 대체로 대부분의 해조류가 사라지는 40°C 내외에서 남조류가 번무하는 것으로 알려지고 있지만(Langford 1990), 우리나라에 건설된 원자력발전소에서는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 40°C 내외의 온배수가 방출되는 경우를 찾아보기 어렵다. 따라서 김 등(1998)이 지적한 바와 같이 한국 연안에서는 온배수가 유입되는 수역이라 할 지라도 남조류의 우점군집이 발달하지 않는 것으로 판단된다.

한편 김 등(1998, 2004)은 온배수가 흐르는 배수로에서도 해조군집의 천이 현상이 진행되고 있는 것으로 보고하였는데, 동해안의 3개 원자력발전소를 대상으로 수행된 이번 조사에서도 원자력발전소 배수로에서 생물량으로 본 우점종들은 그 구성비에 있어서 연차적으로 변화하고 있을 확인할 수 있었다. 이를테면 울진원자력발전소의 경우 1992년부터 1994년 봄까지는 발전소 배수로에서 주로 작은구슬산호말이 우점하였지만, 1995년 봄부터 작은구슬산호말의 출현이 현저하게 감소한 반면 고리마디게발이 새로운 우점종으로 출현하였다. 그러나 1998-2000년에는 고리마디게발보다 작은구슬산호말의 생물량이 더 많은 경향을 보였다(김 등 2004). 한편 월성원자력발전소에서도 갈조 팽생이모자반이 1992-1996년에 걸쳐 비교적 높은 생물량 구성비를 보였지만, 1997년 이후 생물량이 현저하게 줄어들었다(엄 2003). 이와 같이 독특한 환경조건에서 일어나는 해조군집의 천이 현상은 향후 열생태학적 측면에서 중요한 연구과제가 될 것으로 기대

된다.

사 사

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었다. 논문을 정리함에 있어 상세한 지적과 도움을 주신 서울대학교 이인규 명예교수님, 청주대학교 이해복 교수님, 충남대학교 부성민 교수님 그리고 강릉대학교의 김형근 교수님께 심심한 사의를 표한다. 아울러 이 논문을 심사하고 유익한 조언을 아끼지 않으신 심사위원 및 편집위원장님께 감사 드린다.

참고문헌

- 강제원. 1968. 한국동식물도감 제8권 식물편(해조류). 문교부. 465 pp.
- 김영환. 1986. 고리원자력발전소 주변 해조류에 관한 연구 2. 1983년의 해조류 식생. 조류학회지 1: 241-249.
- 김영환. 1999. 원자력발전소의 건설과 가동이 저서 해조류에 미치는 영향. 환경생물학회지 17: 379-387.
- 김영환. 2000. 발전소 온배수와 해양생태계. 전파과학사, 서울. 259 pp.
- 김영환. 2003. 원자력발전과 온배수: 그 현황과 대책. 전파과학사, 서울. 151 pp.
- 김영환, 남기완, 손철현. 1997. 동해안 주문진 조간대의 저서 해조류: 해조상, 분포 및 군집구조. 조류학회지 12: 117-130.
- 김영환, 안중관, 이재일, 엄희문. 2004. 동해안 울진원전의 온배수 방출이 주변 해조군집에 미치는 영향. 조류학회지 19: 257-270.
- 김영환, 엄희문, 강연식. 1998. 한국산 내열종 해조류의 정성·정량적 분석 1. 고리원자력발전소. 조류학회지 13: 213-226.
- 김영환, 유중수. 1992. 서해안 영광원자력발전소 주변의 해조식생. 환경생물학회지 10: 100-109.
- 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. 수산학회지 31: 150-161.
- 김형근, 강래선, 손철현. 1992. 고리 원자력발전소 연안의 해조군집에 대한 온배수의 영향. 조류학회지 7: 269-279.
- 김홍기, 김영환. 1991. 한국 3개 원자력발전소 주변 해조군집. 조류학회지 6: 157-192.
- 엄희문. 2003. 동해안 조간대의 내열성 해조류의 종조성과 생물량. 충북대학교 박사학위논문. 102 pp.
- 이용필, 강서영. 2002. 한국산 해조류의 목록. 제주대학교 출판부, 제주. 662 pp.
- 이인규, 강제원. 1986. 한국산 해조류의 목록. 조류학회지 1: 311-325.
- 이재완. 1991. 한국 동해안 조간대의 해조류 군집구조와 지리적 분포. 서울대학교 박사학위논문. 210 pp.
- 한국전력공사. 1993. 원자력발전소 주변환경 조사보고서 - 일반환

- 경('92). 한국전력공사 기술연구원, KRC-단93-006, 706 pp.
- 한국전력공사. 1994. 원자력발전소 주변환경 조사보고서 - 일반환경('93). 한국전력공사 기술연구원, KRC-단94-007, 765 pp.
- 한국전력공사. 1995. 원자력발전소 주변 환경조사 및 평가보고서 - 일반환경('94). 한국전력공사 기술연구원, KRC-단95-31, 981 pp.
- 한국전력공사. 1996. 원자력발전소 주변 환경조사 및 평가보고서 - 일반환경('95). 한국전력공사 전력연구원, '96 전력연-단41, 904 pp.
- 한국전력공사. 1997. 원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서(1996년보). 한국전력공사 전력연구원, '97 전력연-단233, 614 pp.
- 한국전력공사. 1998. 원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서(1997년보). 한국전력공사 전력연구원, '98 전력연-단398, 642 pp.
- 한국전력공사. 1999. 원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서('98년보). 한국전력공사 전력연구원, '99 전력연-단270, 707 pp.
- 한국전력공사. 2000a. 고리원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서('99년보). 한국전력공사 전력연구원, '00 전력연-단146, 257 pp.
- 한국전력공사. 2000b. 울진원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서('99년보). 한국전력공사 전력연구원, '00 전력연-단148, 222 pp.
- 한국전력공사. 2000c. 월성원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서('99년보). 한국전력공사 전력연구원, '00 전력연-단149, 240 pp.
- 한국전력공사. 2001a. 고리원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서(2000년보). 한국전력공사 전력연구원, '01 전력연-단072, 355 pp.
- 한국전력공사. 2001b. 울진원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서(2000년보). 한국전력공사 전력연구원, '01 전력연-단072, 332 pp.
- 한국전력공사. 2001c. 월성원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서(2000년보). 한국전력공사 전력연구원, '01 전력연-단072, 344 pp.
- 황은경, 박찬선, 손철현, 고남표. 1996. 영광 인근 해역 해조군집의 기능형군별 분석. 수산학회지 **29**: 97-106.
- Abbott I.A. and North W.J. 1971. Temperature influences on floral composition in California coastal waters. *Proc. Intl. Seaweed Symp.* **7**: 72-79.
- Blake N.J., Doyle L.J. and Pyle T.E. 1976. The macrobenthic community of a thermally altered area of Tampa Bay, Florida. In: Esch G.W. and McFarlane R.W. (eds), *Thermal ecology II*. Technical Information Center, Energy Research and Development Administration, Springfield, pp. 296-301.
- Bolton J.J. and Anderson R.J. 1990. Correlation between intertidal seaweed community composition and sea water temperature patterns on a geographical scale. *Bot. Mar.* **33**: 447-457.
- Gessner F. 1970. Temperature: Plants. In: Kinne O. (ed.), *Marine ecology*, Vol. 1, Part 1. Wiley, New York. pp. 363-406.
- Glasstone S. and Jordan W.H. 1980. *Nuclear power and its environmental effects*. American Nuclear Society, Ill. 395 pp.
- 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. 155 pp.
- Kim Y.H. and Lee J.H. 1981. Intertidal marine algal community and species composition of Wolseong area, east coast of Korea. *Korean J. Bot.* **24**: 145-158.
- Langford T.E.L. 1990. *Ecological effects of thermal discharges*. Elsevier Appl. Sci., London. 468 pp.
- Murray S.N. and Littler M.M. 1981. Biogeographical analysis of intertidal macrophyte floras of southern California. *J. Biogeogr.* **8**: 339-351.
- North W.J. 1969. Biological effects of a heated water discharge at Morro Bay, California. *Proc. Intl. Seaweed Symp.* **6**: 275-286.
- Pakker H., Breeman A.M., Prud'homme van Reine W.F. and van den Hoek C. 1995. A comparative study of temperature responses of Caribbean seaweeds from different biogeographic groups. *J. Phycol.* **31**: 499-507.
- Pakker H., Prud'homme van Reine W.F. and Breeman A.M. 1994. Temperature responses and evolution of thermal traits in *Cladophoropsis membranacea* (Siphonocladales, Chlorophyta). *J. Phycol.* **30**: 777-783.
- Patrick R. 1974. Effects of abnormal temperatures on algal communities. In: Gibbons J.W. and Sharitz R.R. (eds), *Thermal ecology*. Technical Information Center, U.S. Atomic Energy Commission. pp. 335-349.
- Roessler M.A. 1971. Environmental changes associated with a Florida power plant. *Mar. Pollut. Bull.* **2**: 87-90.
- Vadas R.L., Keser M. and Rusanowski P.C. 1976. Influence of thermal loading on the ecology of intertidal algae. In: Esch G.W. and McFarlane R.W. (eds), *Thermal ecology II*. Technical Information Center, Energy Research and Development Administration, Springfield. pp. 202-212.
- van den Hoek C. 1982a. Phytogeographic distribution groups of benthic marine algae in the North Atlantic Ocean. A review of experimental evidence from life history studies. *Helgol. Meeres.* **35**: 153-214.
- van den Hoek C. 1982b. The distribution of benthic marine algae in relation to the temperature regulation of their life histories. *Biol. J. Linn. Soc.* **18**: 81-144.
- 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 4 August 2005

Accepted 13 September 2005