

동해안 월성원전의 온배수 방출이 주변 해조군집에 미치는 영향

김영환* · 안중관

(충북대학교 생명과학부)

Effects of Heated Effluents on the Intertidal Macroalgal Community near Wolseong, the East Coast of Korea

Young Hwan Kim* and Jung Kwan Ahn

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

This study is intended to clarify the structure and seasonal dynamics of warm tolerant benthic marine algal community in Korea. The species composition and biomass of marine algae at the discharge canal of Wolseong nuclear power plant on the East Coast of Korea were investigated seasonally from February 2001 to October 2005. As a result, 43 species (6 blue-green, 8 green, 9 brown and 20 red algae) of marine algae were found at the discharge canal during the past five years. In general, the number of species observed was abundant during winter to summer and less in autumn. *Lyngbya confervoides* and *Enteromorpha compressa* always occurred at the discharge canal during the past five years, and *Oscillatoria brevis*, *Padina arborescens* and *Caulacanthus ustulatus* were common species found more than 80% frequency during the study period. Seasonal fluctuations of mean biomass were 2-659 g dry wt m⁻² and dominant species in biomass were *Caulacanthus ustulatus* (contribution to a total biomass proportion 37%), *Enteromorpha compressa* (26%) and *Padina arborescens* (24%). Results showed that, in the floristic composition, the green algae occurred as common algal group at the discharge canal of Wolseong nuclear power plant. In the quantitative aspect, however, the red algae such as *Caulacanthus ustulatus* and *Ahnfeltiopsis flabelliformis* appeared as predominant group at the discharge canal, in contrast to Kori nuclear power plant where there was a definite green algal dominance. Differences in algal communities developed at the discharge canals of three nuclear power plants on the East Coast of Korea can probably be related to local environmental factors.

Key Words: heated effluents, marine algae, nuclear power plant, warm tolerant species, Wolseong

서 론

원자력발전은 화력발전에 비하여 열효율이 낮을 뿐만 아니라 대부분 발전용량이 큰 탓에 화력발전보다 훨씬 많은 양의 냉각수를 필요로 하며, 우리나라의 경우와 같이 관류냉각 방식(once-through cooling system)을 채택하는 발전소에서는 필연적으로 다량의 온배수를 주변 해역으로 방출하게 된다(IAEA 1974; Glasstone and Jordan 1980). 이와 같은 열에너지의 첨가는 주변 해양생태계의 구성 양식과 안정성을 교란시킬 수 있는데, 해양생태계의 중요한 1차 생산자인 해조

류는 고착성 특징으로 인하여 온배수의 영향을 파악하는 지표생물의 하나로 간주된다(Vadas *et al.* 1976; Langford 1990; 김 2000).

화력발전이나 원자력발전의 역사가 긴 외국에서는 이미 오래 전부터 발전소 가동에 따른 온배수의 영향에 관심을 가져왔고 1960년대부터 많은 연구결과가 발표되었다(Trembley 1960; Arndt 1968; Coughlan 1969). 그러나 1970년대부터 본격적으로 연안에 발전소를 짓기 시작한 우리나라에서는 특히 국내 최초의 원자력발전소인 고리원자력발전소가 가동을 개시한 1978년을 전후하여 해조류에 미치는 온배수의 영향이 조사되기 시작하였다.

즉 고리원자력발전소의 가동을 전후한 1977-1978년의 발전소 주변 해조군집의 변화를 밝힌 김과 이(1980)의 보고를

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

필두로, 그간 국내에서는 발전소 주변 해조군집의 정성·정량적 변화(이를테면 Kim and Lee 1981; 김 1986; 김과 김 1991; 김 등 1992, 2004; 김과 유 1992; 김과 허 1998), 내열성 해조류의 규모와 특성(김 1986; 김 등 1998), 발전소 주변 해조군집의 기능형군별 분석(황 등 1996), 수온의 상승이 개체군의 성장률과 성장주기에 미치는 영향(김과 최 1995) 등 온배수의 방출이 해조류에 미치는 영향과 관련한 다각적인 정보가 축적되었다(김 1999 참조).

그런데 계속 증가하는 전력 수요를 충족하기 위하여 21세기에 들어 연안 곳곳에 발전소 후속기들이 추가로 건설되고 있는 실정이다. 즉 2002년에 영광원전 5·6호기가 가동되고, 울진원전 5호기와 6호기가 각각 2004년과 2005년에 상업운전을 시작하였다. 한편 울산시 울주군에는 현재 신고리원전 1-4호기가 건설되고 있고, 경북 경주시에 신월성원전 1-2호기가 건설되고 있다. 이와 같은 후속기의 지속적인 건설과 가동은 발전소 주변 해조군집의 다양성과 풍부성을 변모시킬 가능성을 안고 있으며, 따라서 열생태학적 측면의 장기적인 조사 감시가 필요하다고 판단된다.

이러한 배경 아래 저자들은 원자력발전소 주변 해조군집의 장기적 변동을 추적하는 일련의 연구에 착수하였으며, 그 일환으로 1992-2000년에 걸쳐 동해안의 3개 원자력발전소를 대상으로 배수로 해조군집의 생태적 특성을 보고한 바 있다(김 등 2004; 김과 안 2005). 이어서 후속기가 건설되고 있는 동해안의 월성원자력발전소를 대상으로 최근 5년간 배수로에 출현하는 해조류를 중심으로 발전소 주변 해조군집의 정성·정량적 변화를 조사하였기에 그 결과를 보고하고자 한다. 이와 같은 연구는 향후 후속기 건설이 종료되고 온배수가 추가로 방출될 때 그 환경영향을 파악하는데 있어 귀중한 자료로 활용될 수 있다는 점에서 그 의의를 찾을 수 있을 것이다.

조사지 개황

경상북도 경주시 양남면에 위치한 월성원자력발전소(Fig. 1)는 1977년 5월에 678 MWe 시설용량의 1호기를 착공하여 1983년 4월에 상업운전을 시작하였다. 이어서 700 MWe 용량의 2호기, 3호기, 4호기가 각각 1997년, 1998년, 1999년에 가동을 개시하였다. 한편 기존부지와 인접한 지역에 신월성 1, 2호기의 건설계획이 확정되어 2011년과 2012년 준공을 목표로 건설 중에 있다.

월성원자력발전소는 가압경수로형 원자로를 갖춘 국내 다른 원전과 달리 가압중수로형 원자로이면서 관류냉각방식을 채택하고 있으며, 현재 가동 중인 발전소 4개 호기의 냉각계통은 1호기와 2호기 그리고 3호기와 4호기가 각각 서로 다른 취수로와 배수로를 이용하고 있다. 발전소가 정상적으로 가

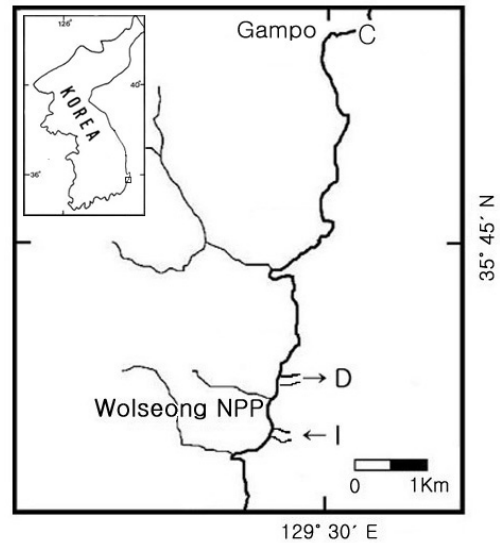


Fig. 1. A map showing the sampling sites of Wolseong nuclear power plant. I, intake; D, discharge; C, control site.

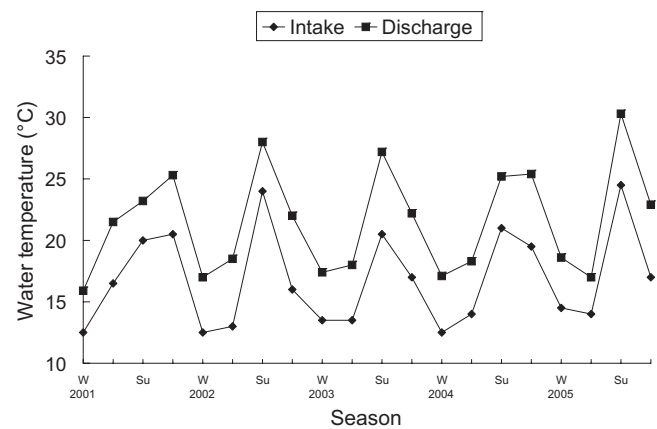


Fig. 2. Comparison of water temperatures measured at the intake and discharge canal of Wolseong nuclear power plant during 2001-2005.

동할 때 각 호기에서 $40.5 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ 의 냉각수가 방출된다(김 2003).

한편 원자력발전소가 정상적으로 가동할 경우 자연해수 수온과 배수구 수온의 온도차는 계절별로 $3.0\text{--}6.7^\circ\text{C}$ 의 범위를 보이고 있으며(Fig. 2), 2001-2005년간의 평균 온도차는 4.7°C 이다(한국전력공사 2002-2006). 계절별로 측정된 배수구의 수온은 매년 여름을 전후하여 23°C 이상 높게 나타나고 있는데, 특히 2005년 여름에는 30°C 이상의 매우 높은 온도를 보였다(한국전력공사 2006).

재료와 방법

2001년 2월부터 2005년 10월에 이르기까지 5년간 계절별로

동해안 월성원자력발전소의 1·2호기 배수로(Fig. 1, D)에서 해조류의 종조성과 생물량을 조사하였다. 아울러 발전소 배수로에 출현하는 해조류의 정성·정량적 특성을 파악할 목적으로 냉각수가 유입되는 1·2호기 취수로(Fig. 1, I)와 온배수의 영향을 받지 않을 것으로 판단되는 지점인 감포를 대조구(Fig. 1, 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.

해조류의 생활형(life form)은 외국의 조사 결과(이들테면 Saito *et al.* 1976; Mathieson and Penniman 1991)와 국내에서 조사된 생물계절적 자료(강 1968; 이와 이 1976, 1982; Park *et al.* 1994)를 참고하였다.

해조류의 생물량 조사

생물량 측정을 위하여 배수로의 해조군집을 대표할 수 있는 암반 또는 방파제 테트라포드 상에 3-5개씩의 0.5 × 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

2001년 2월부터 2005년 10월에 이르기까지 5년간 계절별로 월성원자력발전소 배수로를 중심으로 얻어진 조사 결과를 살펴보면 다음과 같다.

배수로 해조류의 종조성

월성원자력발전소 배수로에서는 5년에 걸친 조사를 통하여 총 43종(남조류 6종, 녹조류 8종, 갈조류 9종, 홍조류 20종)의 해조류가 관찰되었다(Table 1). 이들 해조류 가운데 녹조 갈파래과(Ulvaceae)와 홍조 지누아리과(Halymeniaceae)가 공히 6종으로 가장 다양한 구성을 보였으며, 갈조 모자반과(Sargassaceae)가 4종, 그리고 홍조 산호말과(Corallinaceae), 가시우무과(Hypneaceae) 및 빨간검둥이과(Rhodomelaceae)가 공히 3종씩 나타났다.

조사시기별로는 6-23종의 범위로 해조류가 관찰되었는데 계절별로는 대체로 겨울부터 여름까지 다소 많다가 가을에 출현종수가 적은 계절적 추세를 보였다. 이를테면 2001년의 경우 겨울부터 여름까지 16-23종의 범위로 출현하다가 가을에 8종으로 감소하였으며, 2005년에도 겨울부터 여름까지 8-16종의 범위로 출현하다가 가을에 7종으로 감소하였다.

2001-2005년에 걸쳐 월성원자력발전소 배수로에서 출현한 해조류 43종 가운데 50% 이상의 출현 빈도를 보인 종은 8종(남조류 2종, 녹조류 4종, 갈조류 1종, 홍조류 1종)이었다(Table 2). 이 가운데 특히 남조 실링비아(*Lyngbya confervoides*)와 녹조 납작파래(*Enteromorpha compressa*)의 2종은 지난 5년간 100%의 출현 빈도를 보여서 월성원자력발전소 배수로를 대표하는 해조류로 나타났으며, 그밖에 남조 갈고리흔들말(*Oscillatoria brevis*), 갈조 부챗말(*Padina arborescens*) 그리고 홍조 애기가시덤불(*Caulacanthus ustulatus*) 등도 80% 이상의 비교적 높은 출현 빈도를 보였다.

Table 2에 보인 해조류 8종 가운데 녹조류 3종(납작파래, 가시파래 *Enteromorpha prolifera*, 구멍갈파래 *Ulva pertusa*), 갈조 1종(부챗말) 그리고 홍조 1종(애기가시덤불)의 5종은 월성원자력발전소 배수로에서 지난 1992-2000년에 걸쳐 수행된 종조성 조사에서도 모두 60% 이상의 출현 빈도를 보인 종들로 밝혀졌다(김과 안 2005). 그러나 최근 5년간 발전소 배수로에서 비교적 높은 출현 빈도를 보인 남조류 2종(실링비아, 갈고리흔들말)과 녹조 창자파래(*Enteromorpha intestinalis*)는 1992-2000년의 조사에서 30% 미만의 출현 빈도를 보인 종들이다. 반면에 1992-2000년에 50% 이상의 출현 빈도를 보였던 녹조 잎파래(*Enteromorpha linza*), 갈조 납작솜털(*Ectocarpus arctus*), 그리고 홍조류 고리마디게발(*Amphiroa zonata*)과 부챗살(*Ahnfeltiopsis flabelliformis*) 등은 이번 조사에서 모두 50% 미만의 빈도로 출현하였다.

한편 김과 안(2005)은 월성원자력발전소 배수로에서 1992-2000년의 36회에 걸쳐 조사된 종조성 자료를 바탕으로 얻은 종수/출현횟수 곡선(species/occurrence curve)으로부터 모두 32종(남조류 5종, 녹조류 8종, 갈조류 8종, 홍조류 11종)의 내열종을 판정한 바 있다. 동일한 조사지역을 대상

Table 1. A list of marine algal species found at the discharge canal of Wolsong nuclear power plant during 2001-2005 (W, Winter; Sp, Spring; Su, Summer; A, Autumn)

Species	2001				2002				2003				2004				2005				
	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	
Cyanophyta																					
<i>Entophysalis conferta</i>						+		+		+	+	+									
<i>Hydrocoleum cantharidosmum</i>	+				+					+											
<i>Lyngbya aestuarii</i>				+			+														
<i>L. confervoides</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
<i>Oscillatoria brevis</i>	+	+			+	+		+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
<i>Brachytrichia quoyi</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>Cladophora albida</i>	+	+	+			+														+	
<i>C. rudolphiana</i>	+												+			+					
Phaeophyta																					
<i>Ectocarpus arctus</i>				+	+		+	+		+				+		+	+			+	
<i>Colpomenia sinuosa</i>				+			+					+								+	
<i>Sphacelaria rigidula</i>			+				+			+				+							
<i>Dictyopteris prolifera</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>Amphiroa zonata</i>	+														+					+	
<i>Corallina officinalis</i>				+											+						
<i>C. pilulifera</i>				+	+					+										+	+
<i>Grateloupia acuminata</i>	+			+																	
<i>G. divaricata</i>			+												+						
<i>G. filicina</i>				+																	
<i>G. lanceolata</i>																+					
<i>G. ramosissima</i>	+	+																			
<i>Prionitis cornea</i>				+																+	
<i>Caulacanthus ustulatus</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
<i>Hypnea charoides</i>				+																	
<i>H. japonica</i>			+																		
<i>H. saidana</i>																+					
<i>Ahnfeltiopsis flabelliformis</i>	+	+	+				+							+						+	
<i>Champia parvula</i>														+							
<i>Lomentaria catenata</i>	+													+						+	
<i>Herposiphonia parca</i>														+							
<i>Symphyclocladia latiuscula</i>														+	+	+					
<i>S. marchantioides</i>														+							

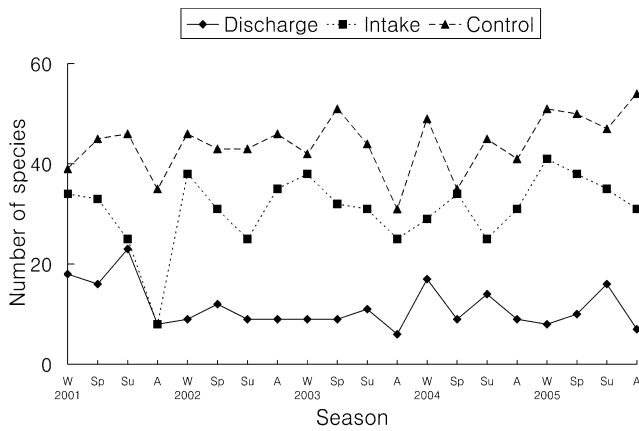


Fig. 3. Seasonal fluctuation of the number of algal species found at the discharge canal, the intake and the control site of Wolsong nuclear power plant during 2001-2005.

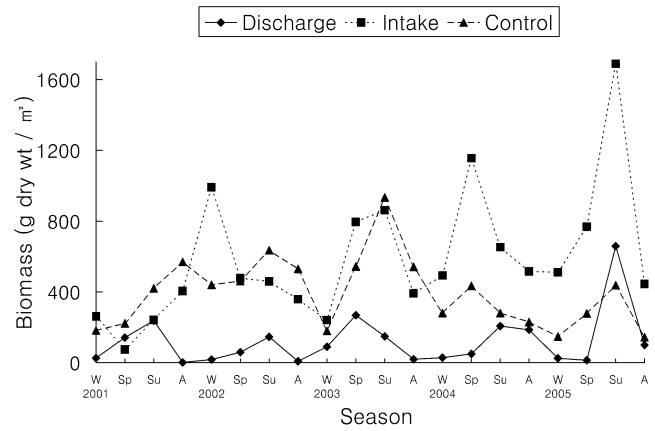


Fig. 4. Seasonal fluctuation of the mean biomass value of marine algae found at the discharge canal, the intake and the control site of Wolsong nuclear power plant during 2001-2005.

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

Division	Species	Occurrence	Frequency (%)
Cyanophyta	<i>Lyngbya confervoides</i>	20	100
	<i>Oscillatoria brevis</i>	17	85
Chlorophyta	<i>Enteromorpha compressa</i>	20	100
	<i>Enteromorpha intestinalis</i>	15	75
	<i>Enteromorpha prolifera</i>	12	60
	<i>Ulva pertusa</i>	11	55
Phaeophyta	<i>Padina arborescens</i>	16	80
Rhodophyta	<i>Caulacanthus ustulatus</i>	19	95

으로 2001-2005년에 걸쳐 수행된 본 조사에서도 이들 내열종의 대부분이 관찰되었다(Table 1). 그러나 김과 안(2005)이 정리한 월성원자력발전소 배수로의 내열종 32종 가운데 남조류 2종(*Microcoleus chthonoplastes*, *Oscillatoria nigroviridis*), 녹조 1종(*Urospora penicilliformis*), 갈조 1종(*Sphacelaria divaricata*) 및 홍조류 3종(*Bangia atropurpurea*, *Gelidium divaricatum*, *Pneophyllum zostericolum*)의 7종은 최근 5년간 월성원자력발전소 배수로에서 출현하지 않는 독특함을 보였다.

발전소의 취수로와 배수로 그리고 대조구의 해조류 출현을 비교한 결과, 배수로의 해조류 다양성은 취수로 또는 대조구보다 대체로 낮았으며(Fig. 3), 조사시기별 평균 출현종수는 배수로에서 12종으로 나타나서 대조구의 평균 출현종수 44종과 취수로의 31종에 비하여 현저하게 낮았다. 1992-2000년에 걸쳐 동해안의 3개 원자력발전소(고리, 월성, 울진)를 대상으로 발전소의 취수로와 배수로 그리고 대조구의 해조류 출현을 비교한 결과에서도 배수로의 해조식생이 가장 빈약한 것으로 확인된 바 있다(김과 안 2005). 따라서 발전소의 복수기를 통과하여 수온이 상승된 냉각수가 흐르는

배수로에서는 냉각수가 유입되는 취수로 또는 온배수의 영향을 받지 않는 대조구에 비하여 전반적으로 출현종수가 낮은 것으로 밝혀졌다.

배수로 해조류의 생물량

월성원자력발전소 배수로에서 5년에 걸쳐 조사된 해조류의 단위면적당 평균 생물량은 조사시기별로 2-659 g dry wt m⁻²의 넓은 범위로 나타났다. 계절별로는 최근 5년간 대체로 봄과 여름에 생물량이 풍부한 경향을 보였다. 출현종수의 경우 대체로 가을에 적은 양상을 보였는데(Fig. 3), 생물량의 경우 2001-2003년에는 가을에 가장 적었지만 2004-2005년에는 배수로에서 가을에 측정된 해조류의 단위면적당 평균 생물량이 겨울이나 봄보다 오히려 많았다(Fig. 4).

발전소의 취수로와 배수로 그리고 대조구에서 계절별로 조사된 해조류 생물량을 비교한 결과, 배수로의 생물량이 취수로 또는 대조구보다 대체로 적었다. 즉 조사시기별로 측정된 단위면적당 평균 생물량의 최근 5년간 평균치는 배수로에서 122 g dry wt m⁻²로 나타나서 대조구 평균 생물량의 5년간 평균치 395 g dry wt m⁻²의 31%에 불과하였고, 특히 취수

Table 3. Major species (sum of seasonal biomass proportion \geq 30%) and their contribution to a total biomass proportion at the discharge canal of Wolseong nuclear power plant during 2001-2005

Division	Species	Contribution (%)
Chlorophyta	<i>Enteromorpha compressa</i>	26
	<i>Cladophora albida</i>	2
	<i>Ulva pertusa</i>	2
Phaeophyta	<i>Padina arborescens</i>	24
	<i>Sphacelaria rigidula</i>	2
Rhodophyta	<i>Caulacanthus ustulatus</i>	37
	<i>Ahnfeltiopsis flabelliformis</i>	4

로의 생물량 평균치 590 g dry wt m⁻²의 20%에 불과한 수준으로 나타났다.

2001-2005년의 20회에 걸친 조사에서 계절별 생물량 구성비의 누적합계가 30%를 넘는 해조류는 모두 7종(녹조류 3종, 갈조류 2종, 홍조류 2종)이었다(Table 3).

이들 7종의 해조류 가운데 4종(납작파래, 구멍갈파래, 부챗말, 애기가시덤불)은 Table 2에 보인 바와 같이 출현종의 종조성 조사에서도 50% 이상의 출현 빈도를 보인 종들이었다. 그러나 녹조 속대마디말(*Cladophora albida*), 갈조 가위갯쇠털(*Sphacelaria rigidula*) 그리고 홍조 부챗말의 3종은 20회에 걸친 조사에서 각각 5회, 4회 및 6회 출현한 종들이다(Table 1).

Table 3에 정리된 바와 같은 해조류 내열종 가운데 홍조 애기가시덤불의 5년간에 걸친 평균 구성비가 37%로 가장 높았고, 녹조 납작파래의 평균 구성비가 26% 그리고 갈조 부챗말이 24%로 나타났다. 이들 3종의 생물량 구성비의 합계는 최근 5년간 배수로에서 조사된 해조류 총 생물량의 약 87%를 차지하였다. 이들 3종은 지난 1992-2000년의 9년간에 걸친 월성원자력발전소 배수로의 생물량 조사에서도 각각 15%, 18% 및 26%의 평균 구성비를 보인 바 있어서(김과 안 2005), 월성원자력발전소 배수로의 해조군집을 대표하는 우점종 해조류로 확인되었다.

동해안에 세워진 3개 원자력발전소 가운데 본 조사가 이루어진 월성원자력발전소보다 약 55 km 남쪽에 위치한 고리원자력발전소에서도 발전소의 취수로 또는 대조구와 비교하여 배수로의 생물량이 대체로 낮았고 생물량 구성비가 높은 종의 구성양식이 월성원자력발전소의 경우와 비슷한 것으로 조사되었다(김 등 1998; 김과 안 2005). 그러나 월성원자력발전소보다 약 160 km 북쪽에 위치한 울진원자력발전소 배수로에서는 취수로보다 오히려 배수로에서 평균 생물량이 많은 것으로 조사된 바 있다(김 등 2004). 특히 울진원자력발전소 배수로에서는 고리나 월성원자력발전소의 경우와 달리 배수로에서 작은구슬산호말(*Corallina pilulifera*)이나 고리

마디게발 등 산호말 무리의 생물량 구성비율이 상대적으로 높게 나타났다(김과 안 2005). 이와 같은 배수로 해조류의 군집 차이는 위도에 따른 환경요인의 변화에 기인하는 것으로 추정된다.

Table 3에 보인 내열종 해조류 7종이 차지하는 생물량 구성비의 계절별 변화 추세를 Table 4와 같다. 먼저 홍조 애기가시덤불은 거의 모든 조사 시기에 걸쳐 생물량이 측정되었으며, 특히 2005년 가을에는 배수로 해조류 생물량의 100%를 차지하였다. 녹조 납작파래는 2001-2003년에 걸쳐 유독 가을에 높은 구성비를 보였는데, 2005년 여름과 가을에는 생물량이 전혀 측정되지 않았다. 한편 동해안의 대표적인 내열종 해조류인 갈조 부챗말은 납작파래의 경우와 반대로 2001-2003년에는 1년 중 가을에 출현하지 않았지만 2004년 이후 불규칙한 계절적 양상을 보였다.

이들 3종의 우점종들과는 달리 부챗살, 속대마디말, 가위갯쇠털 및 구멍갈파래는 20회에 걸친 조사 가운데 1-3회에만 생물량이 관찰되었는데, 이를테면 월성원자력발전소 배수로에서 1992-2000년에 걸쳐 비교적 많은 양으로 출현하였던 홍조 부챗살(김과 안 2005)은 2001년 겨울부터 여름까지 단위면적당 평균 생물량 15-53%를 기록한 다음 2005년 가을까지 전혀 생물량을 측정할 수 없었다. 한편 1992-2000년에 월성원자력발전소 배수로 생물량의 평균 구성비 4%를 보였던 녹조 구멍갈파래(김과 안 2005) 역시 최근 5년 가운데 단지 2005년 봄과 여름에만 단위면적당 평균 생물량 10%대를 기록하였을 따름이다.

배수로 해조류의 정성·정량적 특성 비교

월성원자력발전소 배수로에서는 5년에 걸친 조사를 통하여 총 43종의 해조류가 관찰되었다(Table 1). 이를 해조류 문별로 비교해 볼 때 홍조류가 20종으로 절반에 가까운 46%의 구성을 보이면서 가장 다양하게 나타났고, 갈조류가 9종으로 21%, 녹조류가 8종으로 19% 그리고 남조류가 6종으로 14%의 구성을 보였다.

그러나 계절별로 출현한 해조류의 문별 조성비는 녹조류가 18-50%의 범위를 보이면서 평균 34%로 가장 높았고, 남조류가 9-50%(평균 25%), 홍조류가 0-41%(평균 22%), 그리고 갈조류가 0-34%(평균 19%)의 범위로 나타났다(Fig. 5). 따라서 비록 지난 5년간 월성원자력발전소 배수로에 분포하는 해조류의 출현종수는 홍조류가 가장 다양하였지만 계절별 조성비에 있어서는 녹조류가 가장 중요한 조류 집단이었고, 남조류와 홍조류가 그 다음을 이었으며, 갈조류는 계절별 조성비에서 차지하는 비중이 가장 낮게 나타났다.

주로 갈파래과(Ulvaceae)로 대표되는 녹조류는 비록 종수는 8종으로 그다지 많지 않았지만 조사 시기마다 2-6종씩 관찰되면서 비교적 고루 출현하였다(Table 1). 그러나 출현종

Table 4. Seasonal changes in biomass proportion of major species found at the discharge canal of Wolsong nuclear power plant during 2001-2005

Species	2001				2002				2003				2004				2005			
	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A
<i>Caulacanthus ustulatus</i>	45	22	7	23	92	9	53	1	50	30	27	—	—	38	64	80	19	11	74	100
<i>Enteromorpha compressa</i>	—	1	—	77	1	—	—	99	—	—	—	100	64	20	4	7	80	76	—	—
<i>Padina arborescens</i>	34	23	28	—	7	56	47	—	50	70	71	—	1	42	30	13	—	—	1	—
<i>Ahnfeltiopsis flabelliformis</i>	15	53	16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Cladophora albida</i>	2	—	—	—	—	34	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<i>Sphacelaria rigidula</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	34	—	—	—	—	—	—	—
<i>Ulva pertusa</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	13	17	—

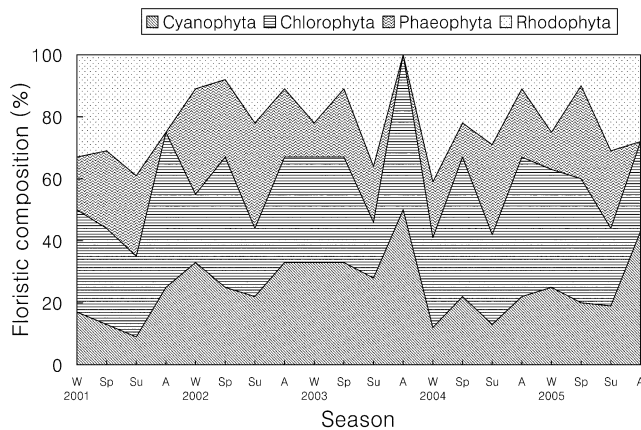


Fig. 5. Seasonal variation of specific composition among algal divisions at the discharge canal of Wolsong nuclear power plant during 2001-2005.

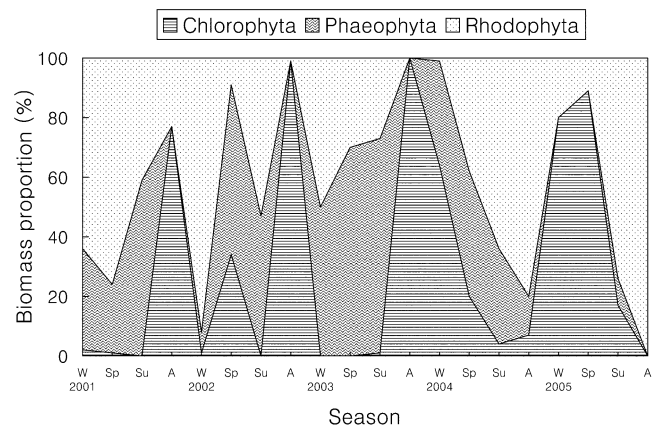


Fig. 6. Seasonal variation of biomass proportion among algal divisions at the discharge canal of Wolsong nuclear power plant during 2001-2005.

수가 20종으로 다양한 홍조류는 5종 이상이 관찰된 횡수가 20회 가운데 고작 5번에 불과하였을 뿐이고, 갈조류의 경우 역시 이와 비슷한 추세를 보였다.

계절별로는 가을에 남조류와 녹조류의 조성비가 높은 반면에 갈조류와 홍조류의 구성비가 낮은 경향을 나타내었다 (Fig. 5). 예를 들어 2003년 가을에는 남조류와 녹조류가 공히 3종씩 관찰된 반면 갈조류와 홍조류는 전혀 출현하지 않았고, 특히 갈조류는 2001년과 2003년 그리고 2005년의 가을에 전혀 관찰되지 않았다(Table 1).

이와 같은 해조류의 문별 계절적 추세는 발전소에서 배출되는 온배수와 관련이 있는 것으로 추정된다. 즉 배수로에 분포하는 해조류 가운데 특히 다년생 또는 일년생 해조류들로 구성되는 갈조류나 홍조류들이 여름을 전후하여 수온이 높은 환경압박을 받으면서 그 생육이 사라지는 반면, 다계절성 해조류인 녹조류들이나 높은 수온 환경에 적응하는 남조류들이 가을에 출현하기 때문인 것으로 사료된다.

한편 2001-2005년에 걸쳐 월성원자력발전소의 배수로에서 출현한 해조류 생물량의 문별 구성비 변동을 계절별로 비교한 결과는 Fig. 6에 보인 바와 같다.

먼저 남작과래, 솜대마디말, 구멍갈과래 등의 녹조류는 2001-2003년의 가을에 77-100%의 생물량 구성비를 보이다가 2004년과 2005년에는 오히려 겨울과 봄에 많은 구성비를 보였다. 부챗말과 가위갯쇠털로 대표되는 갈조류는 가을에 거의 생물량을 찾아볼 수 없고 주로 봄과 여름에 생물량이 측정되는 계절적 특징을 보였다. 한편 애기가시덤불과 부챗살로 대표되는 홍조류는 2001-2003년의 가을에 다소 낮은 생물량 구성비를 보였으나 2004년과 2005년에는 오히려 겨울에 구성비가 높았다.

이와 같이 2001년부터 2005년에 이르기까지 월성원자력발전소 배수로에서 조사한 해조류 생물량의 문별 구성비의 총 평균은 홍조류가 43%로 가장 높았고, 녹조류가 30%, 그리고 갈조류가 27%로 나타났다. 따라서 출현종수의 기여도와는 달리 홍조류의 생물량 구성비가 월성원자력발전소 배수로 해조식생에서 차지하는 비중이 가장 컸으며, 녹조류와 갈조류는 대체로 비슷한 수준을 보였다. 한편 남조류는 5년에 걸친 조사를 통하여 모두 6종이 관찰되기는 하였으나(Table 1), 생물량은 거의 측정할 수 없었다.

온배수가 흐르는 발전소의 배수로에서 해조식생의 종 다

양성이 감소된다는 사실은 이미 많은 연구를 통하여 밝혀지고 있다(Blake *et al.* 1976; Vadas *et al.* 1976; 김 1986; 김 등 1998). 특히 우리나라 동해안에 건설된 고리원자력발전소나 울진원자력발전소 주변 해조군집을 대상으로 수행된 연구에서도 군집의 정성·정량적 측면 모두 배수로에서 낮아진다는 사실이 확인된 바 있으며(김 등 2004; 김과 안 2005), 월성원자력발전소를 대상으로 수행된 본 연구에서도 그와 같은 추세를 확인할 수 있었다.

한편 해조류 개체군 수준에서 수온의 상승이 성장률과 생장주기에 영향을 미칠 수 있음이 제시되었고(김과 최 1995), 발전소 배수로라는 독특한 환경에서도 해조군집의 천이가 일어난다는 장기적 관찰 결과가 보고된 바 있다(김 등 1998; 김과 안 2005). 그러므로 국내 원자력발전소 부지에서 방출되는 막대한 양의 온배수가 주변 해조군집의 정성 정량적 측면에 미치는 영향에 관한 향후의 연구 조사에서는 이와 같은 측면에 대한 면밀한 조사가 이루어질 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2006학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었다. 논문을 정리함에 있어 각종 자료를 정리해 준 충북대학교 생물학과 장민아 양에게 사의를 표한다.

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. 한국환경생물학회지 **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. 2005. 동해안 3개 원전 배수로 해조군집의 특성. 조류학회지 **20**: 217-224.
 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. 한국수산학회지 **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.
 이용필, 강서영. 2002. 한국산 해조류의 목록. 제주대학교 출판부, 제주. 662 pp.
 이용필, 이인규. 1976. 제주도 조간대의 해조군락에 대하여 1. 춘계 해조류의 군락조사. 식물학회지 **19**: 111-118.
 이용필, 이인규. 1982. 제주도 연안 해조자원의 식생분석 연구. 서울대학교 자연대논문집 **7**: 73-91.
 이인규, 강제원. 1986. 한국산 해조류의 목록. 조류학회지 **1**: 311-325.
 한국전력공사. 2002. 월성원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가 보고서(2001년보). 한국전력공사 전력연구원, '02 전력연-단 110. 300 pp.
 한국전력공사. 2003. 월성원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가 보고서(2002년보). 한국전력공사 전력연구원, '03 전력연-단 098. 270 pp.
 한국전력공사. 2004. 월성원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가 보고서(2003년보). 한국전력공사 전력연구원, '04 전력연-단 138. 362 pp.
 한국전력공사. 2005. 월성원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가 보고서(2004년보). 한국전력공사 전력연구원, '05 전력연-단 123. 316 pp.
 한국전력공사. 2006. 월성원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가 보고서 (2005년보). 한국전력공사 전력연구원, '06 전력연-단 168. 338 pp.
 황은경, 박찬선, 손철현, 고남표. 1996. 영광 인근 해역 해조군집의 기능형군별 분석. 한국수산학회지 **29**: 97-106.
 Arndt H.E. 1968. Effect of heated water on a littoral community in Maine, in US Senate Public Works Committee on Thermal Pollution, 90th Congress, 2nd Session. Hearings before subcommittee on air and water.
 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.
 Coughlan J. 1969. *The littoral fauna of Milford Haven, near the outfall of Pembroke power station*. CEGB Internal Report RD/L/N 27/69, Leatherhead, UK.
 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.

- Mathieson A.C. and Penniman C.A. 1991. Floristic patterns and numerical classification of New England estuarine and open coastal seaweed populations. *Nova Hedwigia* **52**: 453-485.
- Park S.H., Lee Y.P., Kim Y.H. and Lee I.K. 1994. Qualitative and quantitative analyses of intertidal benthic algal community in Cheju Island I. Species composition and distributional patterns. *Korean J. Phycol.* **9**: 193-203.
- Saito Y., Sasaki H. and Watanabe K. 1976. Succession of algal communities on the vertical substratum faces of breakwaters in Japan. *Phycologia* **15**: 93-100.
- Trembley F.J. 1960. *Research projects on effects of condenser discharge water on aquatic life*. Progress Report, 1956-59. Institute of Research, Lehigh University, Bethlehem, PA.
- 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.
- 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 28 September 2006

Accepted 10 November 2006

