

월성원자력발전소 온배수가 해조류 종조성 및 군집구조에 미치는 영향

최 한 길*

(원광대학교 생명과학부 · 기초자연과학연구소)

Effects of Thermal Effluents from Wolsong Nuclear Power Plant on Macroalgal Composition and Community Structure

Han Gil Choi*

Faculty of Biological Science and Research Institute for Basic Science, Wonkwang University, Iksan, Jeonbuk 570-749, Korea

Marine algal flora and community structure were seasonally examined at three sites in the vicinity of the Wolsong nuclear power plant in Korea from February to November 2006. A total of 126 seaweeds including 25 green, 31 brown, 70 red algae, and 1 marine plant were identified. The greatest number of species occurred at Jeonchonri (101 species) followed by intake (88 species) and discharge (29 species) during the study period. Of 126 seaweeds, 76 annuals and 13 warm tolerance species were recorded. Dominant species based on important value ($IV > 10$) were *Ulva pertusa* and *Enteromorpha linza* at intake, *U. pertusa* and *Padina arborescens* at discharge, and *Sargassum horneri* and *Corallina pilulifera* at Jeonchonri shore. Annual average biomass exhibited a wide range of variations, from 40.67g m^{-2} in dry weight at discharge to 133.69g m^{-2} at Jeonchonri. Among six functional groups, dominant group was coarsely-branched form at intake and Jeonchonri, but it was different at discharge site as filamentous form. Seaweed community structures of discharge site were distinguishable in decreasing species richness, biomass, species diversity index (H'), richness index (R), and evenness index (J'). Also, the ratios of green algae, warm tolerance species, annual algae, filamentous form and dominance index (DI) remarkably increased. Such phenomenons of discharge site are usually found under environmentally stressful conditions such as high disturbance. Thus, I can conclude that the heated effluents of nuclear power plant act as environmental stress influencing seaweed community structures and it can be detected with various community indices.

Key Words: algal flora, biomass, community, diversity, dominant species, functional form

서 론

해양생태계의 일차생산자인 해조류는 부착생물로서 생물학적, 무생물학적 환경의 변화에 따라 출현종, 종다양성 및 생물량이 달라지는 특징 때문에 생물지시자(bio-indicator)로 사용되고 있다(Orfanidis *et al.* 2001; Arévalo *et al.* 2007; Lee *et al.* 2007). 예를 들면, 연안에 시설된 하수처리장에서 흘러나오는 영양염이 풍부한 생활하수와 원자력발전소 배수구의 온배수는 해조류의 종다양성, 생물량 및 피도를 감소시키는 것으로 알려져 있다(Langford 1990; Díez *et al.* 1999; Arévalo *et al.* 2007).

국내에 건설된 모든 원자력발전소는 관류냉각방식(once-through cooling system)으로 냉각수로 사용되었던 고온의 해수가 배수구를 통하여 해조류가 서식하는 연안으로 대량 방류되고 있다(Kim *et al.* 2004). 배수구에서 온배수의 일방통행적인 흐름은 조석의 영향과 수온의 시·공간적인 변화를 상대적으로 적게 만들어 다른 해안과 구별되는 환경조건을 만든다(Naylor 1965; Langford 1990). 따라서 원자력발전소의 배수구 해역은 흘러나오는 온배수로 인해 주변해역과 구별되는 해조류의 종조성, 기능형의 비율, 군집구조 및 생물량의 변화가 일어나는 것으로 알려졌다(Langford 1990; Steinbeck *et al.* 2005). Abbott and North(1971)는 수온이 20°C 가 넘는 해역에서 생육하는 해조류를 내열종(warm tolerant species)으로 정의하였으며, Kim and Ahn(2005)은 국내의 원자력발전소 배수로에서 주로 관찰되는 해조류 37

*Corresponding author (hgchoi@wku.ac.kr)

종을 내열종으로 구분하였다.

현재까지 원자력발전소의 온배수가 해조류에 미치는 영향에 관한 연구는 1983년 이래로 많이 수행되었지만(Kim 1986; Kim and Ahn 2005, 2006; Kim et al. 2007), 대부분의 연구는 취수구, 배수구, 대조구의 3개의 정점에서 출현한 해조류의 종수, 분류군별 구성, 생물량, 종다양도 및 내열종의 변화 등 군집수준에서 평가되었다(Kim et al. 1992; Kim and Choi 1995). 또한, 개체군수준에서 온배수는 부켓살(*Ahnfeltiopsis flabelliformis*)과 붉은까막살(*Priontis cornea*)의 외부형태변화에 영향을 주는 것으로 확인되었다(Kim and Choi 1995). 2000년 이후의 연구는 대부분 동해안에 위치한 울진, 월성 및 고리 원자력발전소의 1개 혹은 3개의 배수로에서 출현한 해조상 및 생물량에 대한 장기모니터링의 결과를 분석 및 비교하여 경향성을 찾는데 집중되었다(Kim et al. 2004; Kim and Ahn 2005, 2006; Kim et al. 2007). 원자력발전소 주변해역에 대한 해조류의 수평분포를 나타내는 C/P, R/P 및 (R+C)/P의 값은 Kim and Kim(1991)에 의해 1회 사용되었고, Kim et al.(2008)은 취수구, 배수구 및 대조구에서 관찰된 해조류 출현종을 Littler and Littler(1984)가 제안한 해조류 기능형군으로 구분하여 비교하였다.

최근에 해조군집을 해석하는 지표로서 다년생과 일년생 해조류의 출현 비율(Orfanidis et al. 2001, 2003)과 Littler and Littler(1984)의 6가지 기능형군을 근거로 구분한 생태학적 상태그룹(Ecological State group)인 ESG I(다육질형, 유절산호말형, 각상형)과 ESG II(엽상형, 사상형, 성긴분기형)의 비율을 사용하기도 한다(Orfanidis et al. 2001). 또한, 해조류 군집간의 출현종의 우점도 경향을 *k*-dominance곡선으로 비교하였다(Arévalo et al. 2007).

따라서 본 연구는 월성원자력발전소의 취수구, 배수구 및 전촌리 해안에 서식하는 해조류 군집을 계절적 종조성, 수평분포지수, 기능형비, 생태학적상태그룹, 생물량 및 다양한 군집지수(다양도, 풍도, 균등도지수 등)와 *k*-dominance곡선을 이용하여 비교함으로써 온배수가 해조류 군집변화에 어떠한 영향을 미치는지, 어떤 군집지표가 배수구 해조군집의 특징을 주변해역의 해조군집과 구별하는지를 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

채집방법

해조류는 경북 경주시 양남면에 위치한 월성원자력발전소의 취수구(35° 42'N, 129° 28'E)와 취수구에서 150 m 거리에 있는 배수구 해안(35° 42'N, 129° 28'E)과 발전소에서 방출된 온배수 영향이 거의 받지 않을 것으로 판단되는 전촌리(35° 47'N, 129° 29'E)에서 2006년 2월부터 2006년 11월까지 계절

별로 정량 및 정성 채집되었다. 취수구와 배수구는 방파제로 둘러싸여 있어 대조구인 전촌리에 비해 외해에서 오는 파도의 영향이 적었다. 조사정점의 해조류 부착기질은 모두 암반이었으나 배수구 암반은 45°의 경사로 배열되어 있었다. 정량채집은 각 정점을 대표할 수 있는 조건대를 설정하고 10 × 10 cm로 구획된 방형구(50 cm × 50 cm)를 상, 중, 하부에 놓고 현장에서 피도와 빈도를 Saito and Atope(1970)의 방법에 의해 야장에 기록한 후 끝칼을 이용하여 방형구내에 출현하는 모든 해조류를 전량 채집하였다. 채집된 해조류는 현장에서 포르말린-해수 용액(5-10%)으로 고정시켜 실험실로 운반 후 현미경을 사용하여 동정하였으며, 출현종 목록 및 국명은 Lee and Kang(2001)에 따랐다. 본 연구에서 출현한 해조류 중에서 내열종은 Kim and Ahn(2005)에 의해, 일년생(annual)과 다년생(perennial) 해조류의 구분은 Kang(1968)에 의해 결정하였다.

군집분석

정량 채집된 해조류는 담수로 수회 세척하여 모래와 불순물을 제거하고 동정한 후 60°C로 설정된 건조기에서 7일간 건조한 후 건조량을 측정하고 단위 면적당(m²) 생물량으로 환산하였다. 피도는 피도 등급에 의해 기록된 야장을 근거로 단위 면적당 피복 백분율로, 빈도는 25개의 소방형구에 대한 각 종의 출현 방형구 수의 비로 구하였다. 상대피도는 방형구내의 전 출현종의 피도 합에 대한 대상종의 피도 백분율로, 상대빈도는 방형구내의 전 출현종의 빈도 합에 대한 대상종의 빈도 백분율로 나타냈다. 각 정점의 우점종(dominant species)을 판단하는 중요도는 상대피도와 상대빈도의 산술평균으로 나타냈다.

정성 채집된 해조류를 동정하여 분류군별로 구분한 후 갈조류에 대한 녹조류의 비(C/P)와 갈조류에 대한 홍조류의 비(R/P)를 이용하여 해조류의 수평분포지수와 지리적 분포를 구분하는 지수로 사용하였고 (R+C)/P도 계산하였다(Feldmann 1937; Segawa 1956; Cheney 1977).

기능형분석

해조류의 기능형은 출현종의 형태 및 내부구조에 따라 엽상형(sheet form), 사상형(filamentous form), 성긴분기형(coarsely branched form), 다육질형(thick leathery form), 유절산호말형(jointed calcareous form), 각상형(crustose form)의 6개 그룹으로 구분되었으며(Littler and Littler 1984), 이를 근거로 하여 ESG I(다육질형, 유절산호말형, 각상형)과 ESG II(엽상형, 사상형, 성긴분기형)로 구분되었다(Orfanidis et al. 2003).

군집지수

계절별로 모든 방형구의 평균 피도를 정점별로 계산하고 정성자료와 함께 Margalef(1958)의 풍도지수 (richness index, R), Fowler and Cohen(1990)의 Shannon's 다양도지수 (diversity index, H')와 균등도 지수 (evenness index, J), McNaughton (1967)의 우점도 지수(dominance index)를 비롯하여 출현종의 존재 유무(presence/absence) 자료를 이용하여 Bray-Curtis(Bray and Curtis 1957)의 유사도지수 (similarity) 및 출현종에 대한 우점도 경향을 비교하기 위한 *k*-dominance 곡선(Lambshead *et al.* 1983)은 PRIMER version 6 (Clarke and Gorley 2006)으로 계산 및 도식화되었다. 집괴분석이 일어난 개체군에 대한 유의차는 Similarity profile test(SIMPROF)를 이용하여 검정하였다.

통계분석

계절별 및 조위별 생물량에 관한 유의차 검정은 two-way ANOVA를 이용하였으며, 자료에 대한 Homogeneity of variance는 Cochran's test로 하였고 본 연구에서 생물량 데이터는 변환(Log transformation)한 후에 ANOVA test가 실시되었다. 평균에 대해 유의차가 발견되면, Tukey's 사후 검정 방법을 사용하였다(Sokal and Rohlf 1995). ANOVA분석을 위해서 사용된 통계 프로그램은 STATISTICA version 5.0 이었다.

결 과

종조성

본 연구기간에 월성원자력발전소의 취수구, 배수구 및 전촌리 해안에서 출현한 해조류는 총 126종(녹조 25종, 갈조 31종, 홍조 70종)이, 현화식물은 1종이었다. 분류군별로 보면, 녹조류가 19.69%, 갈조류가 24.41%, 홍조류가 55.12%였으며, 현화식물이 0.79%를 차지하여 홍조류의 출현종수가 최대였고, 다음은 갈조류와 녹조류의 순서로 나타났다(Table 1). 취수구에서 연구기간 동안에 출현한 해조류는 총 88종으로 녹조류 17종(19.32%), 갈조류 23종(26.14%), 홍조류 47종(53.41%), 현화식물 1종(1.14%)이었다. 계절별 출현종은 38-57종의 범위로 가을에 최소, 겨울과 여름에 최대였다. 취수구에서 연중 출현한 해조류는 녹조류 5종, 갈조류 5종, 홍조류가 9종으로 총 19종으로 확인되었다. 배수구에서는 녹조류 11종(37.93%), 갈조류 10종(34.38%), 홍조류 8종(27.59%)으로 총 29종이 출현하였으며, 다른 정점에 비해 녹조류 비율이 매우 높았다. 배수구 해안에서는 가을에 10종으로 최소였고 겨울과 여름에 14종으로 가장 많은 종이 출현하였다. 배수구에서 창자파래(*Enteromorpha intestinalis*), 애기가시덤불(*Caulacanthus okamurae*)과 참가시우무(*Hypnea charoides*)는

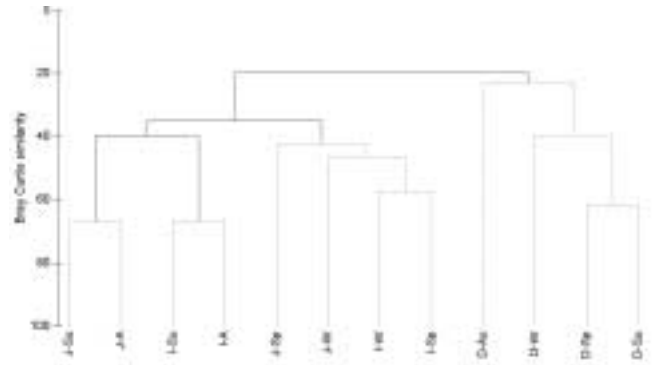


Fig. 1. Results of cluster analysis performed on Bray Curtis similarity from standardized species presence/absence transformed data. The dotted lines indicate no significant difference among three sites and four seasons (SIMPROF test). I, Intake; D, Discharge; J, Jeonchonri; Sp, Spring; Su, Summer; A, Autumn; W, Winter

연중 출현하였다. 전촌리 해안에서는 녹조류 19종(18.81%), 갈조류 23종(22.77%), 홍조류 58종(57.43%), 현화식물 1종(0.99%)으로 총 101종이 관찰되어 최대 출현종수를 보였다. 계절별로 출현한 종은 49-59종으로 가을에 최소, 여름에 최대였다. 전촌리에서는 총 20종(녹조 4종, 갈조 6종, 홍조 10종)이 연중 관찰되었다.

정점별로 계절적 출현종의 유·무로 집괴분석을 한 결과 통계학적 유의차를 보이는 4개 그룹, A그룹(전촌리 여름·가을), B그룹(취수구 여름·가을), C그룹(전촌리와 취수구의 겨울과 봄) 및 D그룹(배수구 4계절)으로 구분되었다(Fig. 1). 배수구(D그룹)는 나머지 3개 그룹과 유사도(19.74%)가 매우 낮았으며, A와 B그룹 간에는 유사도 39.67%로 유의차를 보였다(SIMPROF test, $P < 0.05$). C 그룹내에 존재한 취수구와 전촌리의 겨울·봄의 해조상은 유사도(42.22%)에서 유의차가 없었으며, A·B그룹과 C그룹 간의 유사도는 34.91%로 통계학적인 유의차를 나타냈다(SIMPROF test, $P < 0.05$).

내열성 해조류는 취수구에서 11종(12.50%), 배수구와 전촌리에서는 13종이 출현하여 내열성 해조류의 비율은 전촌리에서 12.87%였으며 배수구에서 44.83%로 가장 높았다. 분류군별 내열종의 비율은 녹조류가 6종(46%)으로 최대였으며, 취수구에서는 다른 정점에서 관찰된 창자파래(*E. intestinalis*)와 가시파래(*E. prolifera*)가 출현하지 않았다. 계절별로 출현한 내열종은 7-10종으로 가을에 최소, 봄과 여름에 최대였다. 배수구에서 연중 출현하는 내열종은 창자파래, 애기가시덤불과 참가시우무로 나타났다(Table 1).

해조류는 생활형에 따라 일년생(annual)과 다년생(perennial)으로 구분되며, 새우말은 다년생으로 취급되었다. 본 연구에서 출현한 126종의 해산식물 중에서 76종(59.84%)이 일년생이었고 51종(40.16%)이 다년생으로 나타났다. 정점별로는 취수구에서는 일년생이 47종(53.41%), 다

Table 1. Marine algal lists, biomass (g dry wt m⁻²), functional (F) form, and life form (LF) occurred at three sites in the vicinity of the Wolsong nuclear power plant in Korea (W, Winter; Sp, Spring; Su, Summer; A, Autumn)

Species	Intake				Discharge				Jeonchonri				F	LF
	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A		
Chlorophyta														
<i>Monostroma grevillei</i>		+							+	4.28	+		S	A
<i>Monostroma sp.</i>			+										S	A
<i>Blidingia minima</i>					0.03								F	A
<i>Enteromorpha compressa*</i>	+	0.66	+	+	0.46	1.71	+		0.41	0.08	+	+	S	A
<i>Enteromorpha intestinalis*</i>					+	+	+	+	+	+	+	+	S	A
<i>Enteromorpha linza*</i>	18.65	1.27	+	1.32			+	0.20		0.77	+	+	S	A
<i>Enteromorpha prolifera*</i>					+	0.40		1.82	+	3.33			S	A
<i>Enteromorpha sp.</i>								+					S	A
<i>Ulva arasakii</i>	+									+	+		S	A
<i>Ulva conglobata</i>		+	1.49						+				S	A
<i>Ulva pertusa*</i>	11.01	8.04	12.63	3.31	3.36	60.97	3.67		1.29	+	0.82	1.07	S	A
<i>Urospora penicilliformis</i>		+											F	A
<i>Chaetomorpha moniligera</i>	0.73	+	0.45	3.34									F	A
<i>Cladophora albida*</i>		+						+			3.00		F	A
<i>Cladophora opaca</i>										+			F	A
<i>Cladophora pusilla</i>			+				+		+		+		F	A
<i>Cladophora rudolphiana</i>										+	+		F	A
<i>Cladophora sakaii</i>				+		+		0.38			+	+	F	A
<i>Cladophora stimpsonii</i>									+	4.88			F	A
<i>Cladophora uncinella</i>	+		+										F	A
<i>Cladophora sp.</i>	+	0.14			+				+	3.59			F	A
<i>Bryopsis pulmosa</i>		+										+	F	A
<i>Codium arabicum</i>									+	+	+	+	CB	A
<i>Codium divaricatum</i>	+										+		CB	A
<i>Codium fragile</i>	3.16	+	13.95	5.77					+	+			CB	A
Phaeophyta														
<i>Ectocarpus arctus</i>	+		+						+	+	+		F	A
<i>Ectocarpus siliculosus</i>								+					F	A
<i>Ectocarpus sp.</i>			+	+			+						F	A
<i>Hicksia mitchellae</i>			+										F	A
<i>Ralfsia verrucosa</i>										+		+	C	P
<i>Leathesia difformis</i>	0.76	0.80		+					3.45	+	+	+	CB	A
<i>Colpomenia bullosa</i>	5.29	1.51	+						+	4.51			CB	A
<i>Colpomenia sinuosa*</i>	3.35	+	0.06	+	+	+				3.40	0.01	+	CB	A
<i>Petalonia fascia</i>	+	+							+	+			S	A
<i>Scytosiphon lomentaria</i>	0.45	0.47							+	1.08			S	A
<i>Punctaria latifolia</i>									+				S	A
<i>Sphacelaria divaricata</i>			+									+	F	A
<i>Sphacelaria furcigera*</i>	+		+		+				+				F	A
<i>Sphacelaria rigidula</i>							+						F	A
<i>Undaria pinnatifida</i>	+	47.74	+						0.81	+	+		TL	A
<i>Ecklonia cava</i>	+												TL	P
<i>Ecklonia stolonifera</i>			+										TL	P
<i>Dictyopteris latiuscula</i>									+				CB	P
<i>Dictyopteris prolifera</i>			5.44							+	+	+	CB	P
<i>Dictyota dichotoma</i>		+	0.04	1.07						0.25	4.03	5.67	S	A
<i>Dictyota maxima</i>									0.76				S	A

Asterisk(*) denotes the warm tolerance species. S, sheet form; F, filamentous form; CB, coarsely branched form; TL, thick leathery form; JC, jointed calcareous form; C, crustose form; A, annual; P, perennial

Table 1. (Continued)

Species	Intake				Discharge				Jeonchonri				F	LF
	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A		
<i>Dilophus okamurae</i>	1.20	+	8.86	0.89					3.03	0.10	+	+	S	A
<i>Padina arborescens</i> *	0.73	+	3.85		3.95	32.09	3.61					+	TL	P
<i>Spatoglossum pacificum</i>									+				S	A
<i>Sargassum fusiformis</i>									20.04	17.70	+	+	CB	P
<i>Sargassum confusum</i>				+									CB	P
<i>Sargassum fulvellum</i> *	+	+	+	+		19.48	8.19		0.79	+	8.82	+	CB	A
<i>Sargassum horneri</i> *	48.85	30.86	+	+			4.27		71.37	102.04	45.21	48.50	CB	A
<i>Sargassum siliquastrum</i>	+								+		+	+	CB	P
<i>Sargassum thunbergii</i>	18.92	4.16	4.73	3.00		0.24			7.20	+	5.47	0.57	CB	P
<i>Sargassum</i> sp.			+				+						CB	P
Rhodophyta														
<i>Erythrotrichia carnea</i>					+						+		F	A
<i>Bangia atropurpurea</i>									+		+		F	A
<i>Porphyra suborbiculata</i>										+			S	A
<i>Porphyra tenera</i>												+	S	A
<i>Porphyra yezoensis</i>	0.11	+							+	+		+	S	A
<i>Auduinella codicola</i>	+												F	P
<i>Nemalion vermiculare</i>											+		CB	A
<i>Gelidium amansii</i>	+	+	+									+	CB	P
<i>Gelidium divaricatum</i>	+											+	CB	P
<i>Gelidium pacifium</i>									+				CB	P
<i>Dumontia simplex</i>			+				+				+		S	A
<i>Pneophyllum zostericola</i>	+												C	P
<i>Lithophyllum okamurae</i>		+	+								+	+	C	P
<i>Amphiroa zonata</i>			3.56	+								+	JC	P
<i>Amphiroa dilatata</i>	1.05		+										JC	P
<i>Corallina officinalis</i>	+		+	33.41							+		JC	P
<i>Corallina pilulifera</i>	3.07	7.90	17.46	22.05					6.73	17.93	7.83	60.91	JC	P
<i>Marginisporum aberrans</i>											+		JC	P
<i>M. crassissima</i>											+		JC	P
<i>Carpopeltis affinis</i>	+		+	4.11					+	+	+	0.66	CB	P
<i>Priontis cornea</i>											+		CB	P
<i>Priontis elata</i>			+	3.55							+	+	CB	P
<i>Priontis patens</i>	+	+	+										CB	P
<i>Grateloupia divaricata</i>	+	+									+		CB	A
<i>Grateloupia filicina</i>											0.08	+	CB	A
<i>Grateloupia okamurae</i>											+		TL	P
<i>Grateloupia prolongata</i>	+		+	+					+	+		+	CB	P
<i>Grateloupia sparsa</i>	+		+						+				TL	P
<i>Grateloupia turuturu</i>		+		1.12						+	+	0.81	TL	P
<i>Grateloupia elliptica</i>	+	+	+	+					2.28	+	+	+	TL	P
<i>Grateloupia lanceolata</i>	+	+	+								+		TL	P
<i>Halymeniopsis acuminata</i>	+		+						+		+		TL	P
<i>Halymeniopsis dilatata</i>		+									+		TL	P
<i>Gloiopeltis furcata</i>	0.32	0.32							+				CB	P
<i>Gloiopeltis tenax</i>		+											CB	P
<i>Caulacanthus okamurae</i> *	+	+	+	+	4.11	+	+	0.62	0.08		+	0.63	F	P
<i>Hypnea charoides</i> *	+		0.13	5.50	+	7.90	3.52	1.28				1.08	CB	A
<i>Hypnea</i> sp.						0.43							CB	A
<i>Gracilaria textorii</i>	1.85	+										+	TL	P
<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	+												CB	P
<i>Ahnfeltiopsis paradoxa</i>	+	+	+						+		+		CB	P

Table 1. (Continued)

Species	Intake				Discharge				Jeonchonri				F	LF
	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A		
<i>Ahnfeltiopsis flabelliformis</i>	+		+	1.46					+		+	+	CB	P
<i>Chondrus ocellatus</i>	+	+	0.53	4.83						+	+	+	CB	P
<i>Chondracanthus intermedia</i>									+	+	+	+	CB	P
<i>Chondracanthus tenellus</i>	0.25	+	4.67	2.89					+	+	+	+	CB	P
<i>Lomentaria catenata</i>	+	6.95	1.55	0.89					+	0.28	+	+	CB	A
<i>Lomentaria hakodatensis</i>			+	0.96					+		+	+	CB	A
<i>Lomentaria</i> sp.							+						CB	A
<i>Champia bifida</i>	+								+	+	+		F	A
<i>Champia parvula</i>	0.11		+						0.59	+	+	+	F	A
<i>Antithamnion nipponicum</i>										+			F	A
<i>Callithamnion minutissima</i>										+			F	A
<i>Ceramium japonicum</i>		+		+									F	A
<i>Ceramium kondoii</i>				+						+		+	F	A
<i>Ceramium paniculatum</i>									+				F	A
<i>Ceramium tenerimum</i>					0.03					+			F	A
<i>Acrosorium polyneurum</i>	+			+					+	+	+	+	S	P
<i>Acrosorium yendoii</i>			0.20	+					+	+	+		S	P
<i>Acrosorium</i> sp.			+										S	P
<i>Myriogramme crozieri</i>	+												S	A
<i>Dasya sessilis</i>										+			F	A
<i>Chondria crassicaulis</i>	+	0.55	10.37	3.41					17.45	+	0.55	33.17	CB	A
<i>Laurencia intermedia</i>											+		CB	A
<i>Laurencia okamurae</i>			+										CB	A
<i>Laurencia venusta</i>				+							0.32	0.97	CB	A
<i>Polysiphonia japonica</i>									+	+	+		F	A
<i>Polysiphonia morrowii</i>	+	+	+	+	+				+	+	0.02	4.07	F	A
<i>Polysiphonia yendoii</i>												+	F	A
<i>Symphyocladia latiuscula</i>	0.07	3.58	0.78	2.20						+	+		CB	P
<i>S. marchantioides</i>									+	+			CB	P
Spermatophyta														
<i>Phyllospadix iwatensis</i>			+								+		TL	P
Biomass(g dry wt m ⁻²)	119.9	115.0	90.74	105.1	11.9	123.2	23.3	4.3	136.3	164.2	76.2	158.1		
Chlorophyta	9	11	9	6	6	5	5	6	11	13	12	7		
Phaeophyta	15	12	17	9	3	4	5	2	17	15	12	13		
Rhodophyta	33	22	30	23	5	3	4	2	26	29	34	29		
Spermatophyta			1								1			
Total	57	45	57	38	14	12	14	10	54	57	59	49		

년생이 41종(46.59%)이었으며, 배수구에서는 일년생이 25종(86.21%), 다년생이 4종(13.79%)이었으며, 전촌리에서는 일년생이 61종(60.40%), 다년생이 40종(39.60%)으로 나타났다. 취수구와 전촌리에서 다년생 해조류는 40-47%를 차지하고 있으나, 배수구에서는 다년생이 단지 14%였으며 일년생이 86%로 우점하였다.

생물량, 피도 및 수직분포

해조류의 연평균 생물량(g dry wt m⁻²)과 피도(%)는 취수구에서 107.67g과 47.97%, 배수구에서 40.67g과 25.21%, 전

촌리에서 133.69g과 44.63%로서 해조류의 생물량은 전촌리-취수구-배수구의 순서였고, 피도는 취수구에서 최대, 배수구에서 최저로 나타났다(Fig. 2A). 3개 정점에서 계절별 생물량을 two-way ANOVA로 분석한 결과 생물량은 정점별로 유의차가 관찰되었으나(F_{2,24} = 10.44, P < 0.001), 계절별 유의차는 없었다(F_{3,24} = 1.18, P = 0.34). 배수구의 생물량은 취수구와 전촌리에 비해 현저히 낮았으며 취수구와 전촌리에서 연평균 생물량은 유의차가 없었다(Tukey HSD test).

계절별 생물량은 취수구에서 여름에 최소(90.74 g)이고 겨울(119.94 g)에 최대였으나 통계적 유의차는 발견되지 않았

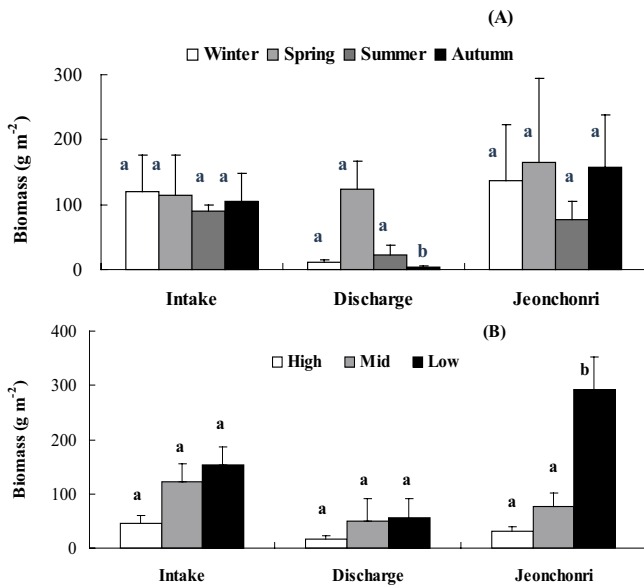


Fig. 2. Mean biomass(g dry wt m⁻²) in different seasons(a) and tidal levels(b) at three sites in the vicinity of the Wolsong nuclear power plant in Korea. Bars are standard errors.

으며(Fig. 2A), 피도는 26.95 - 93.98%로서 가을에 최소였고 여름에 최대였다. 여름에 피도가 최대였으나 생물량이 낮은 것은 피도에 비해 생물량이 낮은 엽상형인 구멍갈파래의 피도가 25.19%로 매우 높았기 때문이다. 한편, 배수구의 생물량과 피도는 가을(4.29 g, 6.44%)에 최소이고 봄에 123.20 g과 55.00%로 최대값을 보였다. 배수구에서 계절별 생물량과 피도는 구멍갈파래(60.97 g, 34.56%)와 부챗말(32.09 g, 8.50%)이 증가하는 봄에 최대였고 수온이 높은 여름에는 이들의 생물량(구멍갈파래 3.67 g, 부챗말 3.61 g)과 피도(구멍갈파래 2.31%, 부챗말 3.88%)가 점차 감소하였고, 이들이 사라진 가을에는 최소값을 보여, 구멍갈파래와 부챗말이 배수구의 생물량과 피도를 결정하는 주요종임이 확인되었다. 배수구에서 봄철 생물량은 가을에 비해 통계적으로 유의수준에서 높게 나타났다(Fig. 2A). 전촌리에서 생물량은 76.15 - 164.22 g, 피도는 28.64 - 69.51%의 범위로 봄에 최대이고 여름에 최소였으나, 계절별 생물량에는 유의차가 없었다.

조위별 연평균 생물량은 취수구에서 46.20 - 154.33 g dry wt m⁻², 배수구에서 16.99 - 55.01 g dry wt m⁻², 전촌리에서 31.99 - 292.27 g dry wt m⁻²의 범위로 모두 조간대 상부에서 최소였고 하부에서 최대였다(Fig. 2B). 3개 정점에서 조위별 생물량은 정점(two-way ANOVA, F_{2,27} = 6.37, P < 0.01)과 조위별로(F_{2,27} = 12.94, P < 0.001) 유의차가 관찰되었다. 또한, 생물량은 정점과 조위의 상호작용에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다(F_{2,27} = 4.08, P < 0.05). 취수구의 조위별 생물량은 유의차가 없었으며, 우점종은 겨울에는 구멍갈파래, 납작파래(상부)-구멍갈파래, 지충이(중부)-팽생이모자반, 지충이(하부)였으며, 봄에는 구멍갈파래-미역-팽생이모자반과

Table 2. Mean biomass (g dry wt m⁻²), coverage (%), relative coverage (RC), relative frequency (RF) and importance value (IV) of dominant seaweeds for four seasons at the three sites at Wolsong nuclear power plant in Korea.

Site / Species	Biomass	Coverage	RC	RF	IV*
Intake					
<i>Ulva pertusa</i>	8.75	11.43	23.83	16.81	20.32
<i>Enteromorpha linza</i>	5.31	5.33	11.12	11.21	11.16
<i>Chondria crassicaulis</i>	3.58	4.28	8.93	5.50	7.21
<i>Corallina pilulifera</i>	12.62	3.04	6.34	7.51	6.92
Discharge					
<i>Ulva pertusa</i>	17.00	11.06	43.87	31.38	37.63
<i>Padina arborescens</i>	9.91	5.09	20.20	12.23	16.22
<i>Hypnea charoides</i>	3.17	2.47	9.79	9.04	9.42
<i>Enteromorpha compressa</i>	0.54	1.72	6.82	8.51	7.67
<i>Caulacanthus okamurae</i>	1.18	1.53	6.07	7.45	6.76
<i>Sargassum fulvellum</i>	6.92	1.18	4.68	6.38	5.53
Jeonchonri					
<i>Sargassum horneri</i>	66.78	9.88	22.13	9.70	15.91
<i>Corallina pilulifera</i>	23.35	5.28	11.83	13.85	12.84
<i>Chondria crassicaulis</i>	12.79	2.84	6.37	9.70	8.03
<i>Dictyota dichotoma</i>	2.49	2.09	4.69	5.82	5.25

Asterisk(*) denotes importance value (IV) > 5.

참보라색우무가 조간대 상·중·하부에서 각각 우점하였다. 취수구에서 여름에는 상부(구멍갈파래, 작은구슬산호말, 돌가사리)-중부(개그물바탕말, 청각, 지충이)-하부(작은구슬산호말, 청각, 개서실)의 주요종이 각기 다르게 나타났으며, 가을에는 조간대 상부에서 염주말과 참까막살이, 중부와 하부에서는 작은구슬산호말과 참산호말이 생물량을 구성하는 주요종이었다. 배수구의 생물량은 취수구와 전촌리에 비해 낮았고 조간대 상부의 생물량은 중·하부에 비해 낮았으나 조위별 유의차는 관찰되지 않았다(Fig. 2B). 배수구에서 겨울에는 조간대 상부에서 애기가시덤불(생물량에 대해 59.67%)이, 중부와 하부에서는 부챗말이 각각 생물량의 41.51%와 90.88%를 차지하였다. 봄에는 구멍갈파래(상부)-구멍갈파래, 모자반, 참가시우무(중부)-부챗말과 구멍갈파래(하부)가 수직분포를 보였다. 배수구에서 여름에는 상부(구멍갈파래, 모자반)-중부(모자반)-하부(모자반과 팽생이모자반)의 주요종으로 확인되었으며, 가을에는 조간대 상부에서 애기가시덤불이, 중부에서 가시파래가 우점하였으며 하부에서는 참가시우무만 관찰되었다. 전촌리 해안에서 생물량은 조간대 상·중부에 비해 하부에 매우 높았으며(Fig. 2B), 해조류의 수직분포는 겨울에 지충이(상부)-개서실(중부)-팽생이모자반, 툫(하부)이었고 봄에는 가시파래와 대마디말류-명주대마디말과 그레빌레해파래-팽생이모자반과 작은구슬산호말이 조간대 상·중·하부에서 각각 우점하였다. 전촌리에서 여름에는 상부(작은구슬산호말, 지충이)-중부(모자반과 참그물바탕

Table 3. Seasonal variations in the number of seaweed functional form occurred at three sites in the vicinity of the Wolsong nuclear power plant in Korea (W, Winter; Sp, Spring; Su, Summer; A, Autumn; Cu, Cumulus)

Functional form	Intake					Discharge					Jeonchonri				
	W	Sp	Su	A	Cu	W	Sp	Su	A	Cu	W	Sp	Su	A	Cu
S (ESG II)	10	10	10	7	17	4	4	5	4	7	15	15	11	9	21
F (ESG II)	10	8	11	7	20	7	2	3	5	13	12	15	11	8	25
CB (ESG II)	25	18	23	19	33	2	5	5	1	8	22	20	26	24	37
TL (ESG I)	8	7	8	2	12	1	1	1	0	1	4	4	7	4	11
JC (ESG I)	3	1	4	3	4	0	0	0	0	0	1	2	3	2	5
C (ESG I)	1	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2
No. of ESG II	45	36	44	33	70	13	11	13	10	28	49	50	48	41	83
No. of ESG I	12	9	13	5	18	1	1	1	0	1	5	7	11	8	18
Total	57	45	57	38	88	14	12	14	10	29	54	57	59	49	101

S, sheet form; F, filamentous form; CB, coarsely branched form; TL, thick leathery form; JC, jointed calcareous form; C, crustose form

말)-하부(팽생이모자반)의 주요종이 각기 다르게 나타났으며, 가을에는 조간대 상부에서 개서실, 참가시우무와 구멍갈파래가, 중부에서 개서실(생물량에 대해 51.44%)과 작은구슬산호말(35.02%)이, 하부에서는 팽생이모자반(48.45%)과 작은구슬산호말(42.98%)이 생물량의 대부분을 차지하였다.

중요도

각 정점에서 출현한 해조류 중에서 4계절의 평균 중요도가 5.0 이상인 생물종의 생물량과 피도는 다르게 나타났다 (Table 2). 취수구의 주요종은 구멍갈파래, 잎파래, 개서실과 작은구슬산호말로 나타났으며 가장 우점적으로 출현한 구멍갈파래는 연평균 피도 합(47.97%)의 23.82%를 차지하였다. 배수구에서는 구멍갈파래, 부챗말, 참가시우무, 납작파래, 애기가시덤불, 모자반이 주요종이었으며, 중요도를 기준으로 할 때 제1우점종인 구멍갈파래와 제2우점종인 부챗말의 연평균 생물량과 피도의 합은 26.91g dry wt m²과 16.15%로서 (Table 2), 전체 생물량(40.67g dry wt m²)과 피도(25.21%)의 각각 66.17%와 64.06%를 차지하였다. 구멍갈파래는 취수구와 배수구에서, 그리고 개서실(*Chondria crassicaulis*)과 작은구슬산호말은 취수구와 전촌리에서 중요도가 5.0 이상으로 나타났다. 전촌리 해안에서의 주요종은 팽생이모자반, 작은구슬산호말, 개서실, 참그물바탕말이었으며, 가장 우점하는 팽생이모자반(생물량 66.78 g dry wt m², 피도 9.88%)은 전체 생물량(133.69 g dry wt m²)의 49.95%와 전체 피도(44.63%)의 22.14%를 차지하였다.

계절별 제1, 2우점종 및 중요도를 보면, 취수구에서는 겨울에 잎파래(35.27)와 구멍갈파래(20.69)가, 봄에는 구멍갈파래(26.48)와 작은구슬산호말(15.55), 여름에는 구멍갈파래(23.90)와 개서실(15.26)이었고, 가을에는 참가시우무(22.48)와 잎파래(15.17)로 나타났다. 특히, 구멍갈파래는 겨울, 봄, 여름의 3계절에 걸쳐 우점적인 출현을 보여 취수구의 대표종

이었다. 배수구에서는 겨울에 구멍갈파래(27.25)와 부챗말(23.98), 봄에 구멍갈파래(56.52)와 부챗말(13.65), 여름에 참가시우무(25.21)와 부챗말(22.52), 가을에 참가시우무(47.88)와 애기가시덤불(15.97)이 각기 제1, 2우점종으로 나타났다. 전촌리 해안에서는 겨울에 툫(12.64)과 지층이(10.97), 봄에는 잎파래(14.54)와 명주대마디말(14.50), 여름에 팽생이모자반(26.15)과 작은구슬산호말(19.11), 가을에 개서실(22.63)과 팽생이모자반(19.67)이 우점하는 것으로 나타났다.

기능형 및 생태학적 상태그룹

본 연구기간에 3개 정점에서 출현한 해조류와 새우말(다육질형)을 6개의 기능형으로 구분하면, 성긴분기형 45종(35.43%), 사상형 35종(27.56%), 엽상형 25종(19.69%), 혁질형 13종(10.24%), 유절산호말형 6종(4.72%), 각상형 3종(2.36%)이었다(Table 1). 출현종 127종에서 생태학적상태그룹 I(ESG I)에 속하는 종은 해산식물인 새우말을 포함하여 22종(17.32%)이고, ESG II에 속하는 종은 105종(82.68%)으로 나타났다.

정점별로 보면, 취수구에서는 성긴분기형, 사상형, 엽상형, 혁질형, 유절산호말형, 각상형의 순서를 보였으며, ESG I의 종은 18종(20.45%), ESG II는 70종(79.55%)으로 나타났다 (Table 3). 배수구에서는 사상형, 성긴분기형, 엽상형, 혁질형의 순서로서 사상형의 비율이 44.83%로서 가장 높고 유절산호말형과 각상형은 출현하지 않았다. 배수구에서의 ESG I에 속하는 종은 1종(3.45%)이고 ESG II는 28종(96.55%)이었다. 전촌리에서는 성긴분기형, 사상형, 엽상형, 혁질형, 유절산호말형, 각상형의 순서를 보였다. 전촌리 해안에서의 ESG I의 종은 18종(17.82%)이고 ESG II는 83종(82.18%)이었다 (Table 3).

계절별 기능형의 구성종을 살펴보면, 취수구에서 엽상형과 사상형의 출현종수는 1년 동안 거의 유사하였으며, 성긴

Table 4. Annual seaweed community structures at three sites in the vicinity of the Wolsong nuclear power plant in Korea

Community structures	Intake	Discharge	Jeonchonri
Number of species	88	29	101
Dominant taxon group (%)	red (53%)	green (38%)	red (57%)
Warm tolerance species (%)	13%	45%	13%
Annual species (%)	53%	86%	60%
Dominant functional form	CB (38%)	Sheet (45%)	CB (37%)
Ecological state group I (%)	20%	3%	18%
Biomass (g dry wt. m ⁻²)	108	41	134
Percent cover (%)	48%	25%	45%
Dominance index (DI)	0.35	0.64	0.34
Diversity index (H')	2.87	1.83	2.94
Richness index (R)	22.43	8.66	26.22
Evenness index (J')	0.64	0.54	0.64
Chlorophyta/Phaeophyta (C/P)	0.74	1.10	0.83
Rhodophyta/Phaeophyta (R/P)	2.04	0.80	2.52
(R+C)/P	2.78	1.90	3.35

분기형과 혁질형은 가을에 최소였으며, 겨울에 최대였다 (Table 3). 배수구에서는 겨울철에 사상형의 소형해조류 (*Blidingia minima*, *Cladophora* sp., *Sphacelaria furcigera*, *Erythrotrichia carnea*, *Ceramium tenerrimum*, *Polysiphonia morrowii*)가 출현하여 최대였고 봄에 2종으로 최소였다. 전촌리 해안에서는 모든 계절에 성긴분기형이 다른 기능형군에 비해 많이 출현하였으며, 특히 여름철에 성긴분기형과 지누아리류(*Grateloupia* spp.)와 같은 혁질형이 많이 출현하였다 (Table 3). 계절별로 ESG II의 비율은 취수구에서 77.19 - 86.84%, 배수구에서 91.67 - 100%, 전촌리에서 81.36 - 90.74%로서 배수구에서 최대였다.

군집지수

해조류의 피도(coverage)를 이용하여 산출한 다양한 군집지수는 Table 4와 같으며, 4계절에 출현한 해조류 종수와 피도의 평균으로 계산한 우점도지수는 취수구 0.35, 배수구 0.64, 전촌리가 0.34로서 취수구와 전촌리가 유사하게 나타났으며 구멍갈파래와 부챗말이 상대적으로 우점하는 배수구에서 최대였다 (Table 4). 계절별 우점도지수는 취수구(0.43 - 0.69)와 전촌리(0.27 - 0.55)에 비해 배수구(0.19 - 0.78)에서 높은 값을 나타냈다 (Table 4). 특히, 배수구에서 우점도 지수는 제1, 2우점종인 구멍갈파래와 부챗말의 피도가 높은 겨울-여름철에 높았으며, 구멍갈파래의 피도가 최대(34.56%)인 여름에 최대값을 보였고, 구멍갈파래와 부챗말이 사라진 가을에 최소였다.

종다양도 지수(H')는 배수구(1.83)에서 최소였고 취수구는 2.87로서 전촌리(2.94)와 유사한 값을 보였다. 계절별로는 취수구에서는 여름에 최대(2.34)였고, 배수구와 전촌리에서는 봄에 최대로 나타났다. 풍도지수(R)는 총 101종이 출현한 전

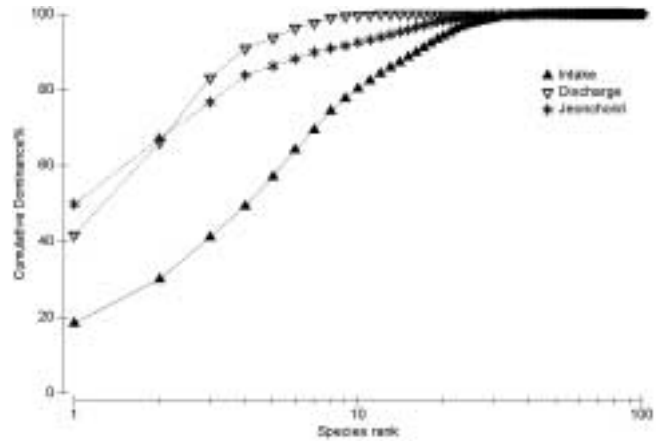


Fig. 3. K-Dominance curves (x-axis logged) for mean biomass at three sites in the vicinity of the Wolsong nuclear power plant in Korea. Data were pooled for four seasons and three tidal levels.

촌리(26.22)에서 29종이 출현한 배수구(8.66)에 비해 3배 이상 높았다. 균등도지수(J')는 전촌리와 취수구에서 0.64로 동일하였으며, 배수구에서 0.54로 낮은 값을 보였다.

한편, 정점별 출현종의 연평균 생물량으로 출현종의 우점도를 k-dominance 곡선으로 도식하면, 배수구는 변형곡선에, 취수구는 사선형에 가까운 곡선을 보였고, 전촌리는 중간형을 보였다 (Fig. 3). 배수구에서는 우점하는 5종이 전체 생물량의 60% 정도를 차지하지만, 전촌리와 배수구에서는 각기 우점종 4종과 3종이 각각 전체 생물량의 80%를 구성함으로써 종다양성은 취수구, 전촌리와 배수구의 순서를 보였다.

해조상의 지역적 특성을 나타내는데 유용한 C/P값은 취수구에서 0.74, 배수구 1.10, 전촌리에서 0.83으로 배수구에서 최대였다 (Table 4). 하지만, 연구기간 동안 출현한 해조류에 대한 R/P값은 배수구(홍조 8종, 갈조 10종)에서 최소(0.80)이고 전촌리(홍조 58종, 갈조 23종)에서 2.52로 최대였다. 이러한 R/P값의 차이는 홍조류의 출현비율이 배수구에서 27.59%, 전촌리에서 57.43%인 결과에서 기인하였다. (R+C)/P값의 경우는 취수구 2.78, 배수구 1.90, 전촌리 3.35로서 전촌리에서 최대이고 배수구에서 최소로 나타났다 (Table 4).

고찰

해조류의 출현종수는 원자력발전소의 온배수가 흐르는 배수구와 취수구 및 대조구와 구별되는 패턴을 보였다 (Kim and Choi 1995). 동해안에 위치한 울진원자력발전소의 배수구에서 출현한 종수는 취수구와 대조구에 비해 1993-1994년에 각각 51-74%, 1994-1995년에 각각 57-85% 수준으로 나타

났다 (Kim and Choi 1995; Kim *et al.* 2008). 또한, 동해안에 위치한 3개(고리, 월성, 울진) 원자력발전소의 장기모니터링(1992-2000년)에서도 배수구의 출현종수는 대조구에 비해 30-47%, 취수구에 비해 50-61%의 수준이었다(Kim and Ahn 2005). 본 연구기간에 월성원자력발전소 배수구의 출현종수는 29종으로 취수구와 전촌리 해안의 한 계절에 출현한 종수의 1/2수준이며, 취수구 88종, 전촌리의 101종에 비해 각각 33%와 29%로 다른 원자력발전소 배수구 및 이전의 연구에 비해 출현종수가 현저하게 낮은 것으로 확인되었다. 이처럼 배수구에서 해조류의 출현종수가 다른 정점에 비해 적은 이유는 해수 흐름의 방향, 유속, 파도에 대한 노출정도, 기질 등에 의한 영향도 예견되지만, 특히 원자력발전소의 배수구 수온이 취수구·대조구에 비해 4-6°C가 높고 여름에는 최대 8°C 이상 높아(Glasstone and Jordan 1980; Kim and Choi 1995), 온배수 영향이 가장 클 것으로 사료된다. 본 연구의 대상지역인 월성원자력발전소의 취수구와 배수구의 수온을 5년(2001-2005년)간 측정 한 결과, 계절별 수온차는 3.0-6.7°C(평균 4.7°C)의 범위로 배수구에서 높게 나타난 것이 이를 뒷받침하고 있다(Kim and Ahn 2006).

해조류 출현종의 구성에서도 배수구는 취수구·대조구와 다른 경향을 보이는 것으로 알려져 왔다. 본 연구에서 취수구·전촌리에서는 홍조류의 비율이 50%이상을 보였으나 배수구에서는 홍조류(28%)에 비해 녹조류가 38%로 주요한 분류군이었다. 이러한 결과는 온배수가 흐르는 배수구에서 녹조류가 대표적인 분류군임 밝힌 Kim and Ahn(2006)의 결과와 일치한다. 또한 내열종의 비율은 배수구의 45%에 비해 취수구와 전촌리에서 13%로 낮게 나타났으며, 일년생의 비율도 배수구(86%)에서 취수구·전촌리 해안(60%)에 비해 높았다. 이외에도 배수구 해조류는 사상형 그룹이 우점하고 생태학적상태그룹 I(ESG I)의 비율이 취수구 및 전촌리에 비해 뚜렷하게 구분되는 양상을 보였다(Table 5). Orfandis *et al.*(2001)은 안정된 환경에서는 ESG I에 속하는 다육질형, 유절산호말형 및 각상형의 해조류가 주로 서식하고 ESG II에 속하는 해조류(엽상형, 사상형, 성긴분기형)는 환경적인 스트레스가 심한 교란 혹은 오염지역에서 나타나는 해조류로 구분하였다. 월성원자력발전소 배수구에서 ESG II에 속하는 해조류의 기능형군이 97%에 해당하는 것은(Table 4), 배수구에서 온배수에 의한 환경적스트레스가 매우 심각하다는 것을 반영하고 있다. Littler and Littler(1984)는 교란이 많은 불안정한 서식처에서는 엽상형과 사상형 해조류의 출현빈도가 높고 안정된 환경에서는 다육질형과 유절산호말형이 우점한다고 하였다. 본 연구에서 배수구에서 사상형(45%)의 비율이 취수구와 전촌리에 비해 20% 이상 높았고 유절산호말형 해조류가 전혀 관찰되지 않음으로써 온배수가 해조류의 스트레스로 작용하는 것으로 확인되었다.

원자력발전소의 배수구와 같이 자연수온보다 높은 온도에서 형성되는 해조류의 군집은 종조성 뿐만 아니라 생물량이 감소한다는 것은 이미 알려진 사실이다(Vadas *et al.* 1976; Kim and Ahn 2005, 2006). Kim and Ahn(2005)은 동해안에 위치한 3개 원자력발전소 배수구의 평균 생물량은 9년 동안(1992-2000년) 계속적으로 취수구와 대조구에 비해 낮았으며, 특히 월성원자력발전소의 배수구에서는 127 g dry wt m⁻²으로 취수구(301 g dry wt m⁻²)와 대조구(305 g dry wt m⁻²)의 42% 수준이었다. 본 연구에서 연평균 생물량은 배수구(41 g), 취수구(108 g) 및 대조구인 전촌리가 134 g dry wt m⁻²으로 배수구에서 현저하게 낮았다. 또한, 배수구의 생물량은 계절적 변동이 매우 심하여 구멍갈파래(봄 생물량의 49%)와 부챗말(26%)의 생물량이 증가하는 봄에 123 g dry wt m⁻²로 최대였으며, 연평균 생물량의 55%를 차지하는 매우 불안정한 군집구조를 가지고 있었다.

이외에도 온배수가 해조류에 미치는 직접적인 영향은 엽체의 경화(hardening), 탈색(bleaching) 혹은 세포 원형질 분리(cell plasmolysis) 등이 있으며(Lobban and Harrison 1994), *Macrocystis*의 성체는 20°C 이상의 수온에서 수주일 노출될 경우 조직의 파괴가 발생하였다(North 1979). 본 연구에서도 여름과 가을철에 녹조류의 파래류와 구멍갈파래를 비롯하여 갈조류의 부챗말, 홍조류의 애기돌가사리 등의 해조류에서 탈색현상이 관찰되었으며, 월성원자력발전소의 배수구에서는 봄과 여름에 번무하였던 구멍갈파래와 부챗말이 해수의 온도가 최대에 도달하는 가을에는 거의 사라지고 없었다.

해조상이 열대 혹은 한대 해역에 가까운지를 구분하는 방법으로 Segawa(1956)는 C/P값을, Feldman(1937)은 R/P값을 제안하였으며 Cheney(1977)는 (R+C)/P의 값을 사용하였다. 본 연구에서 C/P값과 R/P값은 온대성 혹은 혼합성 해조상을 보였다. (R+C)/P의 값이 3 이하이면 온대성 내지 한대성 해조상이고 6 이상이면 열대성 해조상이라 하였는데, 본 연구기간에 출현한 해조류에 대한 (R+C)/P의 값은 취수구와 배수구는 온대·한대성이고 전촌리는 혼합성 해조상을 보였다. Kim and Kim(1991)이 동해안의 울진과 월성 및 서해안의 영광원자력발전소의 취수, 배수구 및 대조구에서 2년(1987-89년)에 걸쳐 출현한 해조상을 토대로 계산하면, 3개 지역 및 정점에서 C/P값은 평균 0.4-0.6이고, R/P값은 평균 1.6-2.3이며, (R+C)/P의 값은 평균 2.2-2.9의 범위를 보여 온대지역 혹은 혼합성 해조상을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 배수구에서는 취수구와 대조구에 비해 C/P, R/P 및 (R+C)/P값이 낮게 나타났으나 해조상의 구분은 뚜렷하지 않았다.

결론적으로 월성원자력발전소 인근의 해조류의 군집구조는 출현종수, 주요분류군, 내열종, 일년생, 기능형군, 생태학

적상태그룹, 생물량, 피도, 우점도지수, 종다양도지수, 풍도 지수 등에서 취수구·전촌리와 배수구로 구분되었다. 하지만, C/P값, R/P값 및 (R+C)/P값은 취수구, 배수구 및 전촌리에서 약간의 차이만 관찰되어 배수구의 특징을 나타내는 지수로서는 한계가 있었다. 배수구에서 생물량과 피도가 계절별 변동이 심하고 녹조류, 일년생, 사상형 해조류가 우점하고 ESG II의 비율이 특히 높은 것은 교란 및 오염과 같은 환경적스트레스가 강한 해역에서 나타나는 특징으로서 온배수가 취수구와 대조구인 전촌리에 비해 출현종수 및 군집구조를 변화시키는 환경적스트레스로 작용하고 있음을 알 수 있었다.

사 사

본 연구를 위해 현장 채집과 자료정리를 도와준 원광대학교 이기훈과 유현일 군에게 고마운 마음을 전한다.

참고문헌

- Abbott I.A. and North W.J. 1971. Temperature influences on floral composition in California coastal waters. *Proc. Intl. Seaweed Symp.* 7: 72-79.
- Arevalo R., Pinedo S. and Ballesteros E. 2007. Changes in the composition and structure of Mediterranean rocky-shore communities following a gradient of nutrient enrichment: Descriptive study and test of proposed methods to assess water quality regarding macroalgae. *Mar. Poll. Bull.* 55: 104-113.
- Bray J.R. and Curtis J.T. 1957. An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin. *Ecol. Monogr.* 27: 325-349.
- Cheney D.P. 1977. R & C/P-A new and improved ratio for comparing seaweed floras. *Suppl. J. Phycol.* 13: 129.
- Clarke K.R. and Gorley R.N. 2006. *PRIMER v 6: user manual/tutorial*. PRIMER-E Ltd, Plymouth, 190 pp.
- Diez I., Secilla A., Santolaria A. and Gorostiaga J.M. 1999. Phytobenthic intertidal community structure along an environmental pollution gradient. *J. Mar. Pollut. Bull.* 38: 463-472.
- Feldmann J. 1937. Recherches sur la vegetation marine de la Mediterranee. La cote des Alberes. *Rev. Algol.* 10: 1-339.
- Fowler J. and Cohen L. 1990. *Practical Statistics for Field Biology*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 227 pp.
- Glasstone S. and Jordan W.H. 1980. *Nuclear Power and Its Environmental Effects*. American Nuclear Society III, 395 pp.
- Kang J.W. 1968. *Illustrated Encyclopedia of Fauna and Flora of Korea*. Vol. 8 (Marine algae), Samhwa Publ. Co. Seoul, 264 pp.
- Kim H.K., Kang R.S. and Sohn C.H. 1992. Effect of thermal effluents on the marine algal community at the coast of Kori nuclear power plant. *Korean J. Phycol.* 7: 269-279.
- Kim H.K. and Kim Y.H. 1991. Marine algal communities around three nuclear power plants in Korea. *Korean J. Phycol.* 2: 157-192.
- Kim Y.H. 1986. A study on the marine algae at the coast of Kori nuclear power plant. 2. Marine algal vegetation in 1983. *Korean J. Phycol.* 1: 241-249.
- Kim Y.H. and Ahn J.K. 2005. Ecological characteristics of marine algal communities at the discharge canals of three nuclear power plants on the east coasts of Korea. *Algae* 20: 217-224.
- Kim Y.H. and Ahn J.K. 2006. Effects of heated effluents on the intertidal macroalgal community near Wolsong, the east coast of Korea. *Algae* 21: 453-461.
- Kim Y.H., Ahn J.K., Lee J.I. and Eum H.M. 2004. Effects of heated effluents on the intertidal macroalgal community near Uljin, the east coast of Korea. *Algae* 19: 257-270.
- Kim Y.H., Ahn J.K., Yoon H.D. and Jang M.A. 2007. Effects of heated effluents on the intertidal macroalgal community near Gori nuclear power plant. *Algae* 22: 297-304.
- Kim Y.H. and Choi S.I. 1995. Effects of cooling system at power plant on marine algal vegetation. *Korean J. Phycol.* 10: 121-141.
- Kim Y.S., Choi H.G. and Nam K.W. 2008. Seasonal variations of marine algal community in the vicinity of Uljin nuclear power plant, Korea. *J. Environ. Biol.* 29: (in press).
- Lambhead P.J.D., Platt H.M. and Shaw K.M. 1983. The detection of differences among assemblages of marine benthic species based on an assessment of dominance and diversity. *J. Nat. Hist.* 17: 859-874.
- Langford T.E.L. 1990. *Ecological Effects of Thermal Discharges*. Elsevier Appl. Sci., London, 468 pp.
- Lee K.H., Yoo H.I. and Choi H.G. 2007. Seasonal community structure and vertical distribution of medicinal seaweeds at Kkotji in Taean peninsula, Korea. *Algae* 22: 209-219.
- Lee Y.P. and Kang S.Y. 2001. *A Catalogue of the Seaweeds in Korea*. Cheju National University Press, 662 pp.
- Littler M.M. and Littler D.S. 1984. Relationships between macroalgal functional form groups and substrate stability in a subtropical rocky intertidal system. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 74: 13-34.
- Lobban C.S. and Harrison P.J. 1994. *Seaweed Ecology and Physiology*. Cambridge University Press, Cambridge, 376 pp.
- Margalef R. 1958. Information theory in ecology. *Gen. Syst.* 3: 36-71.
- McNaughton S.J. 1967. Relationship among functional properties of California Grassland. *Nature* 216: 168-169.
- Naylor E. 1965. Effects of heated effluents upon marine and estuarine organism. *Adv. Mar. Biol.* 3: 63-103.
- Orfanidis S., Panayotidis P. and Stamatis N. 2001. Ecological evaluation of transitional and coastal and water; A marine benthic macrophytes-based model. *Medit. Mar. Sci.* 2: 45-65.
- Orfanidis S., Panayotidis P. and Stamatis N. 2003. An insight to the ecological evaluation index(EEI). *Ecol. Indic.* 3: 27-33.
- Saito Y. and Atobe S. 1970. Phytosociological study of intertidal marine algae. 1. Usujiri Benten-Jima, Hokkaido. *Bull. Fac. Fish. Hokkaido Univ.* 21: 37-69.
- Segawa S. 1956. *Coloured Illustrations of the Seaweeds of Japan*, Osaka, 195 pp.
- Sokal R.R. and Rohlf F.J. 1995. *Biometry*, 3rd edn W.H. Freeman, New York, 887 pp.
- 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. *Ecol. Appl.* **15**: 1813-1832.

Vadas R.L., Keser M. and Rusanowaki 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. 202-211.

Received 30 March 2008

Accepted 10 May 2008