

태안화력발전소 주변 해역의 해조상 및 군집구조

유현일·박향하·최한길*
원광대학교 생명과학부

Marine Algal Floras and Community Structures in the Vicinity of the Taean Power Plant in Korea

Hyun Il YOO, Hyang Ha PARK, Han Gil CHOI*
Faculty of Biological Science, Wonkwang University, Iksan 570-749, Korea

Marine algal flora and community structure were examined seasonally at four study sites around Taean Power Plant, Korea from Jan. to Nov. 2006. A total of 73 algae species (12 green, 9 brown, 52 red) and 1 marine plant were identified. The number of species was maximal at the power plant Discharge (57 species) site followed by Hakampo (46 species), Intake (28 species) and Breakwater (15 species) sites during the study period. The average biomass in dry weight varied from 13.12g/m² at Intake to 69.60g/m² at Hakampo. Dominant and subdominant species in terms of biomass were *Gelidium divaricatum* - *Ulva pertusa* at Intake, *Chondria crassicaulis* - *Ulva pertusa* at Discharge, *Corallina pilulifera* - *Chondrus ocellatus* at Breakwater, and *Corallina pilulifera* - *Sargassum thunbergii* at Hakampo. Species richness of warm tolerant and green algae were greater at Discharge site than Hakampo, showing similar species richness. However, community indices were not distinguishable between Discharge and other study sites. In conclusion, species richness and biomass of seaweeds were greater at Discharge site compared to intake and breakwater sites, and the abundance of warm tolerant and green algal species were higher than Hakampo.

Key words: Algal flora, Community, Diversity, Thermal effluent, Warm tolerant species

서론

해양생태계에서 해조류는 일차생산자로서 해양무척추동물과 어류의 서식처 및 산란장으로서 중요한 기능을 가지는 것으로 알려져 있다(Ugarte and Sharp, 2001; Lindstrom, 2009). 고착생물인 해조류는 성장 및 성숙을 제한하는 수온, 광주기, 영양염 등의 다양한 물리·화학적 환경에 의해 수평 및 수직적 분포가 결정되므로(Lobban and Harrison, 1997), 어떤 해역에서 해조류의 출현종수, 풍도 및 군집구조는 이러한 물리·화학적 환경에 대한 반응의 산물이라 할 수 있다(Orfanidis et al., 2001; Carballo et al., 2002; Bolton et al., 2004).

다양한 환경요인 중에서 수온은 해조류의 지리적 분포를 제한하는 가장 중요한 요인으로서 넓은 해역에 걸쳐 구배적으로 변화하고 이에 따라 출현하는 해조류도 점진적으로 변화하는 것으로 알려져 있다(Lüning, 1990; Breeman and Parkker, 1994). 따라서, 일부 해조학자들은 수온과 출현한 해조류의 분류군과의 관계를 이용하여 갈조류에 대한 녹조류와 홍조류 출현종의 비율로 한대와 열대지역을 구분하는 지표로 사용하였다(Feldmann, 1937; Segawa, 1956; Cheney, 1977). 연안역에 건설된 공장 및 발전소에서 냉각수로 사용된 후 방출되는 온배수는 좁은 해역에서 해조상 및 군집구조의 급격한 변화를 일으킨다(Vadas, 1979; Devlinny, 1980; Snoeij and Prentice, 1989; Choi, 2008). 예를 들면, 온배수의 영향을 받는 배수구에서는 해조류 종다양성과 생물량의 감소, 내열종인 녹조류와

남조류가 증가하는 등 가까운 거리에 있는 취수구와 온배수의 영향이 없는 대조구와 구별되는 특징을 보인다(Abbott and North, 1971; Patrick, 1974; Vadas, 1979; Devlinny, 1980; Snoeij and Prentice, 1989). 국내에서 원자력발전소 온배수가 해양생태계 특히 해조류의 군집에 미치는 영향에 대한 연구는 Kim and Lee(1980)에 의해 시작된 이래로 해조류 군집의 종조성 및 군집구조의 변화(Kim and Huh, 1998; Kim et al., 2007; Choi, 2008)와 내열종 해조류의 변동(Kim and Ahn, 2005) 등에 관한 많은 연구가 수행되었다. 연구 결과, 발전소 온배수는 외국의 연구사례와 유사하게 올진, 월성, 영광원자력발전소에서는 내열종의 증가(Kim and Choi, 1995), 고리와 월성원자력발전소에서는 녹조류의 증가와 생물량 및 출현종수의 감소를 보였다(Kim and Huh, 1998; Kim and Ahn, 2005; Choi, 2008). 또한, 월성원자력발전소의 배수구에서는 해조류의 피도 감소(Choi, 2008)와 고리원자력발전소에서의 종조성의 변화(Kim et al., 2007)등을 초래하며, 다양한 군집지수(우점도 지수, 종다양도지수, 풍도지수 등)가 발전소 배수구와 대조구를 구분하는 특징으로 사용될 수 있음이 밝혀졌다(Choi, 2008). 또한, 해조류의 개체군 수준에서는 온배수는 부챗살(*Ahnfeltiopsis flabelliformis*)과 붉은까막살(*Prionitis cornea*)의 외부형태를 변화시키고 부챗살의 경우에는 봄-여름에 개체의 무게와 성장을 촉진시켰다(Kim and Choi, 1995).

원자력발전소 온배수가 해조류의 군집 및 개체군에 미치는 영향에 대해서 많은 연구가 수행되었음에 비해 화력발전소의

*Corresponding author: hgchoi@wku.ac.kr

온배수에 대한 영향은 거의 알려져 있지 않은 상태이다. 남해안의 삼천포화력발전소에서는 온배수가 해조류의 출현종수 감소를 초래하고 구멍갈파래 (*Ulva pertusa*)의 출현시기에도 영향을 주는 것으로 확인되었다 (Yi, 1987). 태안화력발전소의 경우에는 발전소 건설 전인 1987년 (Yoo and Kim, 2003a)과 건설된 후 발전소 가동 직전 (Yoo and Kim, 2003b)의 해조상 및 군집구조에 대한 자료가 존재한다. 따라서, 본 연구는 태안화력발전소의 가동 이후에 온배수가 해조상 및 해조류 군집구조에 어떠한 영향을 미치는지를 이전에 수행된 태안화력발전소 인근의 연구와 비교하는 것을 목적으로 하고 있다. 또한, 원자력발전소의 온배수 배출 해역에서 내열종 해조류의 출현종수의 증가 패턴이 화력발전소의 배수로에서도 동일하게 나타나는지를 확인하는 것이다.

재료 및 방법

채집방법

해조류 채집장소는 충청남도 태안군 원북면에 위치한 태안화력발전소의 배수구와 반경 약 1km 이내에 위치한 취수구, 방파제의 테트라포드 (tetrapod) 그리고 배수구에서 3km정도 떨어진 곳에 위치한 학암포를 대조구로 지정하여 2006년 1월부터 2006년 11월까지 계절별로 정량 및 정성 채집하였다 (Fig. 1).

배수구는 다른 조사정점에 비해 외해에서 오는 파도의 영향을 적게 받았으나 방출수의 유속에 의한 영향을 받는 지점이었고 취수구와 방파제는 테트라포드로 이루어져 있었으며 배수구 및 학암포는 바위암반이 매우 잘 발달되어 있었다.

정량채집은 간조 시 드러난 조간대에서 각 정점을 대표할 수 있는 지점을 선택하여 10cm × 10cm으로 구획된 방형구 (50cm × 50cm)를 조간대 상부, 중부 및 하부에 놓고 현장에서 피도와 빈도를 Saito and Atobe (1970)의 방법에 의해 야장에 기록한 후 방형구내에 출현한 모든 해조류를 끝갈을 이용하여 전량 채집하였다. 해조상을 파악하기 위해서는 조사해역에서 식하는 모든 해조류를 정성 채집하였다. 채집된 해조류는 현장에서 포르말린-해수 용액 (5-10%)으로 고정시켜 실험실로 운반한 후 현미경을 사용하여 동정하였으며, Lee and Kang (2002)의 분류체계를 기준으로 출현종 목록 및 국명을 정리하였다.

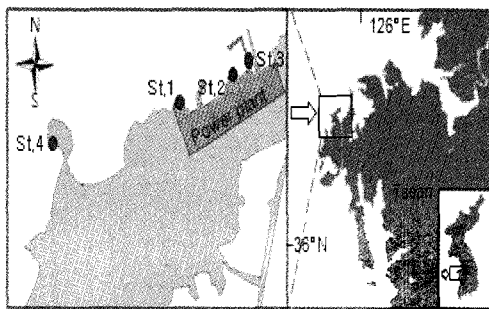


Fig. 1. A map of study area showing the location of sampling sites (St. 1, Intake; St. 2, Discharge; St. 3, Breakwater; St. 4, Hakampo).

군집분석 및 군집지수

정량 채집된 해조류는 담수로 수회 세척하여 모래와 불순물을 제거하고 동정한 후 60°C로 세팅된 건조기에서 10일간 건조하여 0.01g 수준까지 건조량을 측정하여 생물량 (g/m^2)으로 환산하였다. 총 생물량 중 내열종 해조류가 차지하는 비율과 일년생 및 다년생 해조류의 비율을 산출하여 각 정점별 비율을 실시하였다 (Kang, 1968; Kim and Ahn, 2005; Choi, 2008). 피도는 피도 등급에 의해 기록된 야장을 근거로 단위면적당 피복 백분율로, 빈도는 전체 소방형구(25개)에 대한 각 종이 출현한 방형구 수의 비로 계산하였으며 정점의 우점종을 판단하는 중요도는 상대피도와 상대빈도의 산술평균으로 나타냈다 (Mueller-Dombois and Ellenberg, 1974). 또한, 정점별 출현종과 그들의 생물량으로 풍도지수 (richness index, R), 균등도지수 (evenness index, J)와 다양도지수 (diversity index, H')를 계산하였으며 (Margalef, 1958; Fowler and Cohen, 1990), 우점도 지수 (dominance index, DI)는 제 1, 2우점종의 생물량의 합에 대한 전체 생물량의 비율로서 산출하였다 (McNaughton, 1967; Lee et al., 2007). 우점종은 군집내에서 가장 보편적이고 높은 생물량을 보이는 종으로 하였다 (Barbour et al. 1987; Koh 1990).

또한, 해조류의 출현종 유사도로 각 정점과 계절에 따른 유사도 (similarity)를 분석하고 (Bray and Curtis, 1957) 출현한 해조류의 우점도는 k-dominance 곡선으로 비교하였다 (Lambshhead et al., 1983). 군집지수의 산출 및 도식화에는 PRIMER version 6 (Clarke and Gorley, 2006)을 사용하였으며 유사도 분석에 따른 각 그룹의 유의차는 SIMPROF (similarity profile) tests를 실시하여 검정하였다.

화력발전소의 온배수가 해조상의 변화에 미치는 영향을 파악하기 위해 C/P비, R/P비, (R+C)/P비를 산출하고 해조류의 수평분포와 지리적 분포를 구분하는 지수와 비교하였다 (Feldmann, 1937; Segawa, 1956; Cheney, 1977).

결 과

종조성

본 연구기간에 태안화력발전소의 취수구, 배수구, 방파제와 학암포 해안에서 출현한 해조류는 총 73종으로 녹조류 12종 (16.44%), 갈조류 9종 (12.33%), 홍조류 52종 (71.23%)이고, 현화식물인 새우말 (*Phyllospadix iwatensis*)이 1종 출현하였다. 정점별로 일년간 출현한 해조류의 종수는 15-57종으로 방파제에서 최소이고 배수구에서 최대였다 (Table 1). 태안화력발전소 전체 조사정점의 계절별 출현종수는 겨울에 43종, 봄에 54종, 여름에 35종과 가을에 39종으로서 봄에 최대였고 여름에 최소였다.

취수구에서 출현한 해조류는 28종으로 녹조류 5종 (17.86%), 갈조류 2종 (7.14%), 홍조류 21종 (75.00%)으로 홍조류의 비율이 가장 높았다. 계절별로 출현한 해조류는 3-18종으로 겨울에 최소였고 가을에 최대였으며, 애기우뭇가사리 (*Gelidium*

Table 1. The number of seaweed and seagrass species collected in the vicinity of the Taean power plant in Korea (Wi, winter; Sp, spring; Su, Summer; Au, Autumn; To, Total)

Species	Intake					Discharge					Breakwater					Hakampo				
	Wi	Sp	Su	Au	To	Wi	Sp	Su	Au	To	Wi	Sp	Su	Au	To	Wi	Sp	Su	Au	To
Chlorophyta	1	2	3	3	5	7	8	6	6	12	0	1	4	2	4	4	3	4	5	7
Phaeophyta	0	2	1	1	2	3	7	2	3	8	3	4	0	2	4	1	2	1	2	3
Rhodophyta	2	7	9	14	21	7	20	14	20	37	3	7	3	6	7	19	23	14	13	36
Spermatophyta																1	1	1	1	1
Total	3	11	13	18	28	17	35	22	29	57	6	12	7	10	15	25	29	20	21	47

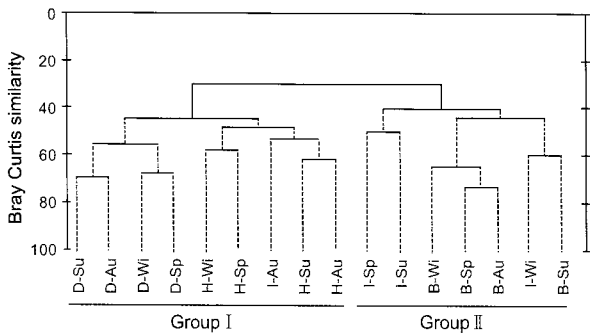


Fig. 2. Results of cluster analysis performed on Bray Curtis similarity from standardized species presence/absence transformed data. The dotted lines indicate no significant difference among four sites and four seasons(SIMPROF test). I, Intake; D, Discharge; B, Breakwater; H, Hakampo; Sp, Spring; Su, Summer; Au, Autumn; Wi, Winter.

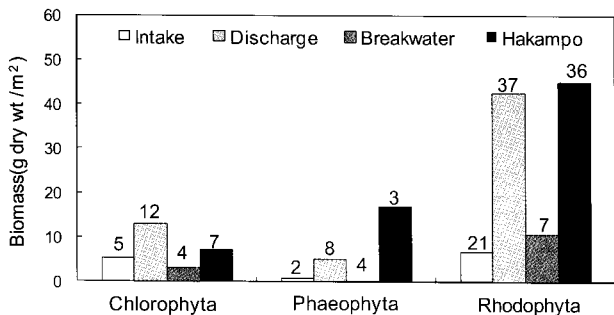


Fig. 3. Annual mean biomass and species number of green, brown and red seaweeds at four sites during the study period. Number indicates number of species occurred.

divaricatum)는 연중 관찰되었다. 배수구에서는 연구기간 동안에 녹조류 12종(21.05%), 갈조류 8종(14.04%), 홍조류 37종(64.91%)으로 총 57종의 해조류가 출현하였으며, 계절별 출현종수는 17-35종으로 겨울에 최소였고 봄에 최대였다(Table 1). 배수구에서 연중 출현한 해조류는 파래류 (*Enteromorpha* spp.), 구멍갈파래 (*Ulva pertusa*), 다시마 (*Laminaria japonica*), 지층이 (*Sargassum thunbergii*), 미끌풀 (*Dumontia simplex*), 작은구슬산호말 (*Corallina pilulifera*), 까막살 (*Carpopeltis affinis*), 개지누아리 (*Grateloupia prolongata*), 미끌지누아리 (*G. turuturu*), 참도박 (*G. elliptica*)과 개서실 (*Chondria crassicaulis*)로 녹조류 1종,

갈조류 3종, 홍조류가 7종이었다. 또한, 배수구에서만 출현한 해조류는 총 21종이었고 그 중 두 계절이상 출현한 해조류는 창자파래 (*Enteromorpha intestinalis*), 실염주말 (*Chaetomorpha linum*), 실우뚝가사리 (*Gelidium pusillum*), 참도박 (*Grateloupia elliptica*), 애기돌가사리 (*Chondracanthus intermedia*), 참깃풀 (*Antithamnion nipponicum*)과 개서실이였다. 방파제에서는 일년 동안 15종이 출현하였고 녹조류(26.67%)와 갈조류(26.67%)의 비율이 높았다(Table 1). 계절별 출현종은 겨울에 6종으로 최소였고 봄에 12종으로 최대였다. 방파제에서 연중 관찰되는 종은 애기우뚝가사리, 작은구슬산호말, 진두발(*Chondrus ocellatus*)이었다. 대조구인 학ampo에서는 녹조류 7종 (15.22%), 갈조류 3종 (6.52%), 홍조류 36종 (78.26%)으로 총 46종이 관찰되었으며, 계절별로 20-29종이 출현하였고, 봄에 최대였다. 학ampo에서 일년내 관찰된 해조류는 구멍갈파래, 지층이, 우뚝가사리 (*Gelidium amansii*), 잘피껍테기 (*Fosliella zostericola*), 작은구슬산호말, 진두발과 참보라색우무 (*Symphocladia latiuscula*)였다. 학ampo에서만 출현한 해조류는 총 9종으로 이 중 두 계절이상 출현한 해조류는 누은분홍잎 (*Acrosorium yendoii*) 1종이었다.

태안화력발전소 인근의 모든 정점에서 출현한 종은 8종으로서 녹조류 2종 (파래류, 구멍갈파래), 갈조류 1종 (다시마), 홍조류 5종 (우뚝가사리, 애기우뚝가사리, 미끌풀, 작은구슬산호말, 진두발)이었다. 계절별 출현종의 유·무를 바탕으로 유사도분석을 실시한 결과 크게 2개의 그룹으로 구분되었다 (Fig. 2). 그룹 I은 배수구와 학ampo, 취수구 (가을)로 묶였으며, 이들의 유사도는 44.52%였다. 그룹 II는 취수구와 방파제로 묶였으며 크게 취수구 (봄, 여름)와 방파제 (겨울, 봄, 가을) 그리고 취수구 (겨울), 방파제 (여름)로 구분되었다(Fig. 2). 두 그룹 (그룹 I 과 II)의 출현종에 대한 유사도는 30.35%로 유의차를 보였다 (SIMPROF test, P<0.05). 또한 배수구와 학ampo에서는 계절에 따라 2개 그룹 (겨울, 봄과 여름, 가을)으로 구분되어 다른 정점과 구분되었다 (Fig. 2).

생물량

태안화력발전소 주변 해역 (취수구, 배수구, 방파제, 학ampo)의 조건대에 서식하는 해조류의 연평균 생물량은 39.32g/m²이고, 정점별로는 13.12-69.60g/m²으로 대조구인 학ampo에서 최대였고 취수구에서 최저였다 (Table 2). 분류군별 생물량의 구성비율은 발전소지역과 대조구인 학ampo로 구분되었는데, 발전소지역 (취수구, 배수구, 방파제)에서는 녹조류가 전체 생물량의 21.31-41.27%로 높은 비율을 보였으나, 학ampo에서는 10.54%로 상대적으로 낮게 나타났다 (Fig. 3). 또한 전체

Table 2. Seasonal mean biomass(g dry wt/m²) of dominant species at four study sites in the vicinity of the Taean power plant in Korea(Wi, Winter; Sp, Spring; Su, Summer; Au, Autumn; LF, life form)

Species	Intake				Discharge				Breakwater				Hakampo				LF
	Wi	Sp	Su	Au	Wi	Sp	Su	Au	Wi	Sp	Su	Au	Wi	Sp	Su	Au	
<i>Enteromorpha</i> spp.*	0.89	3.05	4.30		1.19	6.13	0.92				5.69						A
<i>Ulva pertusa</i> *			1.37	12.04	1.85	+	0.34	41.29			4.54	1.77	2.97		2.52	23.84	A
<i>Scytosiphon lomentaria</i>						8.89											A
<i>Laminaria japonica</i>		0.95			1.39	0.15			0.75								A
<i>Sargassum horneri</i> *		2.65			0.76												P
<i>Sargassum thunbergii</i>						1.46	4.73	3.37					6.89	52.68	8.72		A
<i>Porphyra tenera</i>						3.39											P
<i>Gelidium amansii</i> *																8.06	P
<i>Gelidium divaricatum</i> *	7.33	0.65		7.07				0.09	1.95	3.57	0.62	2.15	0.21			+	A
<i>Dumontia simplex</i>		2.19				0.33				0.83			+	1.42			P
<i>Corallina pilulifera</i> *					21.98	0.90	4.80	15.48	8.67	0.13	6.81	6.28	39.68	6.21	24.86	29.22	P
<i>Grateloupia elliptica</i>					15.59		6.80										P
<i>Gloiopeltis furcata</i>			+											6.15			P
<i>Caulacanthus okamurae</i> *			4.25				0.92										P
<i>Ahnfeltia paradoxa</i>																4.17	P
<i>Chondrus ocellatus</i>	0.95		1.72	3.05	9.12	3.27	0.67	29.40	0.63	1.28	5.26	4.55	9.95		6.12	22.72	P
<i>Chondria crassicaulis</i> *					9.25	1.71	4.89	36.58									P
<i>Symphyocladia latiuscula</i>														+	20.41		A
Other seaweeds						0.38	3.87	0.79					0.06	0.17	0.28	1.09	P
Biomass	9.17	9.49	11.64	22.16	61.13	26.61	27.94	127.0	12.00	5.81	22.92	14.75	59.76	66.63	62.91	89.10	

Asterisk(*)denotes the warm tolerant species. (+, present; A, annual, P, perennial).

생물량에 대한 내열종 해조류의 생물량도 발전소지역 (61.43-83.11%)과 학암포 (49.41%)로 구분되었다. 일년생과 다년생 해조류의 생물량의 비율은 취수구와 배수구는 일년생의 비율이 51.19-71.71%를, 방파제와 학암포는 35.14-37.92%로서 조사정점에 따른 차이를 보였다 (Table 2).

각 정점의 계절별 해조류의 생물량 및 주요 구성종을 보면, 취수구의 생물량은 9.17-22.16g/m² (평균 13.12g/m²)으로 가을에 최대였고 파래류 (겨울-여름)와 구멍갈파래 (여름-가을)와 같은 녹조류가 연중 출현하였다. 홍조류인 애기우뭇가사리는 가을-겨울에, 애기가시덤불은 여름에, 진두발은 여름-가을에 취수구에서 높은 생물량을 보였다 (Table 2). 한편, 취수구에서 갈조류인 켈생이모자반과 미끌풀은 봄철에만 번무하는 계절적인 종으로 확인되었다. 배수구의 계절별 생물량은 26.61-127.00g/m² (평균 60.67g/m²)으로 계절별 변화가 매우 컸으며 취수구와 마찬가지로 가을에 최대였다. 생물량의 주요 구성종은 녹조류인 파래류와 구멍갈파래를 비롯하여 갈조류인 지층이, 홍조류인 작은구슬산호말, 진두발 및 개서실로 나타났다 (Table 2). 배수구에서 고리매 (봄), 다시마 (겨울, 봄), 김 (봄), 도박 (겨울, 여름)은 계절적으로 높은 생물량을 보이는 종이었다. 방파제에서는 계절에 따라 5.81-22.92g/m² 평균 13.87g/m²의 생물량을 보였고 다른 정점에 비해 여름에 최대였고 생물량을 구성하는 주요종은 작은구슬산호말이었으며 여름에는 파래류와 진두발의 생물량이 증가하였다. 대조구인 학암포에서 해조류의 생물량은 건중량으로 59.76-89.10g/m² (평균 69.60g/m²) 이었고 가을에 최대였으며 지층이 (봄)와 작은구슬산호말 (여름, 가을, 겨울)이 계절별로 최대 생물량을 보였다.

한편, 정점별 출현종의 연평균 생물량을 k-dominance곡선으로 비교하면, 배수구에서는 우점종 3종 (개서실, 참갈파래, 작은구슬산호말)이 전체 생물량의 60%이하를 차지하고 취수구 (구멍갈파래, 애기우뭇가사리, 잎파래)와 학암포 (작은구슬

산호말, 지층이, 진두발)에서는 70%정도를 차지한다. 또한, 방파제에서는 우점종인 작은구슬산호말, 진두발과 애기우뭇가사리가 전체 생물량의 80%이상을 보여 k-dominance곡선에서 나타난 정점별 종다양성은 배수구, 취수구, 학암포와 방파제의 순서를 보였다 (Fig. 4).

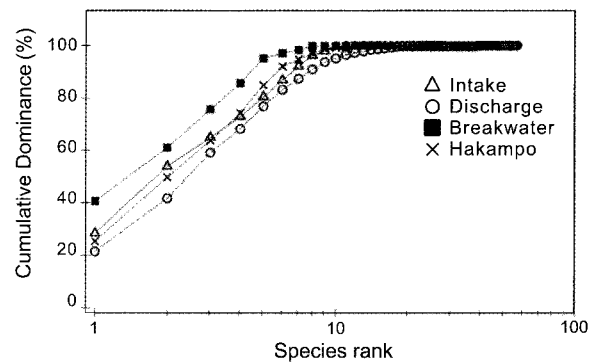


Fig. 4. K-Dominance curves (x-axis logged) for mean biomass at four study sites in vicinity Taean power plant in Korea. Data were pooled for four seasons and three tidal levels.

중요도 및 수직분포

각 정점에서 출현한 해조류의 중요도 (importance value)를 바탕으로 분석한 구간대의 조위별 우점종의 수직분포는 Table 3과 같다. 취수구의 구간대 상부에서는 파래류와 구멍갈파래, 중부에서는 애기우뭇가사리와 구멍갈파래, 하부에서는 잎파래와 켈생이모자반이 주요종이었으며, 애기우뭇가사리는 상부와 중부에서 중요도 10이상인 종으로 확인되었다. 배수구에서는 구멍갈파래와 작은구슬산호말이 상부에서, 작은구슬산호말과 납작파래가 중부에서, 진두발과 개서실이 하부에서

우점하였고 작은구슬산호말은 조간대 전역에서 중요도 10이상의 값을 나타냈다. 방파제에서는 조간대 상부에서 애기우뚝가사리와 납작파래가, 중부에서는 애기우뚝가사리와 구멍갈파래가, 하부에서는 구멍갈파래와 작은구슬산호말이 우점하는 패턴을 보였다. 대조구인 학암포의 조간대 상부에서는 불등풀가사리와 작은구슬산호말이, 중부에서는 구멍갈파래와 작은구슬산호말이, 하부에서는 작은구슬산호말과 참보라색우무가 우점하였다 (Table 3).

군집지수

정점별로 4계절에 출현한 해조류의 평균 생물량으로 산출한 우점도지수(DI)의 경우, 배수구에서는 제 1, 2우점종인 개서실(13.11g/m²)과 구멍갈파래(10.87g/m²)가 전체 생물량(60.67g/m²)의 39.53%를 차지하여 0.40으로 최소였고 방파제에서는 제 1, 2우점종인 작은구슬산호말(5.47g/m²)과 진두발(2.93g/m²)이 전체 생물량(13.87g/m²)의 60.56%를 차지하여 0.61로 최대였다 (Table 4). 출현종수와 관련되는 풍도지수(R)는 57종이 출현한 배수구에서 최대(13.63)였고, 15종이 출현한 방파제에서 5.28로 최저였다 (Table 4). 출현종수와 생물량에 따라 변화하는 균등도지수는 출현종수가 적고 출현한 해조류의 생물량의 차이가 크지 않은 방파제에서 최대였다. 풍도와 균등도에 의해 결정되는 종다양도지수(H')는 배수구에서 가장 높은 값(2.23)을 보였으며 취수구(1.98), 학암포(1.97), 방파제(1.64) 순서로 나타났다.

해조상의 지역적 특성을 나타내는 C/P값은 취수구에서 2.50으로 최대였고 방파제에서 1.00으로 최소였다. 한편, R/P

값은 12.00으로 학암포에서 최대였으며, 방파제에서 1.75로 최저였다 (Table 4). (R+C)/P값의 경우 정점에 따라 2.75-14.33으로서 R/P값과 유사하게 방파제에서 최소(2.75)였고 학암포에서 최대(14.33)였다.

고찰

온배수가 흘러나오는 발전소 배수구 인근에서는 온배수의 영향이 적은 대조구에 비해 해조류의 식생이 상대적으로 빈약한 것으로 알려져 있다 (Kim and Huh, 1998; Kim and Choi, 1995; Choi, 2008). 서해안에 위치한 영광원자력발전소의 배수구에서 출현한 해조류의 종수는 18종으로 대조구인 대신리와 가마미의 36종의 50%수준이며 (Kim and Huh, 1998), 장기간(1992년-2000년) 수행한 모니터링의 결과 동해안의 울진, 고리, 월성원자력발전소 배수로에서는 15-17종이 기록되어 대조구에서 출현한 종수(36-50종)의 30-47%수준으로 알려졌다 (Kim and Ahn, 2005). 태안화력발전소의 경우, 건설된 발전소가 가동되기 전(온배수 배출 전)인 1993년에도 대조구인 학암포 인근에 위치한 분점도(54종)에 비해 배수구(76종)에서 많은 종이 출현하여 주목을 받았는데 (Yoo and Kim, 2003b), 13년이 지난 본 연구에서도 태안화력발전소 배수구에서 출현한 해조류가 57종으로 대조구인 학암포(47종)에 비해 여전히 높게 나타났다. 하지만, 1993년의 연구결과와 비교해 보면, 배수구에서 19종(25%)과 대조구에서 7종(13%)이 감소하여 해조류의 종다양성을 감소시키는 것으로 확인되었다.

Table 3. Vertical distribution of dominant seaweeds based on important value(IV>10) at four study sites near Taean power plant in Korea

	Intake	Discharge	Breakwater	Hakampo
Upper	<i>Enteromorpha sp.</i> (34.78)	<i>Ulva pertusa</i> (31.76)	<i>Gelidium divaricatum</i> (58.85)	<i>Gloiopeltis furcata</i> (32.84)
	<i>Ulva pertusa</i> (17.63)	<i>Corallina pilulifera</i> (26.84)	<i>Enteromorpha compressa</i> (33.42)	<i>Corallina pilulifera</i> (16.83)
	<i>Enteromorpha compressa</i> (15.66)	<i>Scytosiphon lomentaria</i> (12.39)		<i>Ulva pertusa</i> (15.62)
	<i>Gelidium divaricatum</i> (12.75)			<i>Chondrus ocellatus</i> (13.22)
Middle	<i>Gelidium divaricatum</i> (38.39)	<i>Corallina pilulifera</i> (33.22)	<i>Gelidium divaricatum</i> (29.17)	<i>Ulva pertusa</i> (25.40)
	<i>Ulva pertusa</i> (25.87)	<i>Enteromorpha compressa</i> (22.29)	<i>Ulva pertusa</i> (24.68)	<i>Corallina pilulifera</i> (20.88)
	<i>Dumontia simplex</i> (14.10)	<i>Porphyra tenera</i> (13.61)	<i>Corallina pilulifera</i> (18.15)	<i>Sargassum thunbergii</i> (11.68)
	<i>Caulacanthus okamurae</i> (11.79)		<i>Ulva conglobata</i> (16.72)	<i>Chondrus ocellatus</i> (11.31)
			<i>Gelidium amansii</i> (10.31)	
Lower	<i>Enteromorpha linza</i> (45.35)	<i>Chondria crassicaulis</i> (36.13)	<i>Ulva pertusa</i> (41.70)	<i>Corallina pilulifera</i> (49.50)
	<i>Sargassum honeri</i> (17.51)	<i>Chondrus ocellatus</i> (22.97)	<i>Corallina pilulifera</i> (25.53)	<i>Symphyocladia latiuscula</i> (14.33)
	<i>Chondrus ocellatus</i> (14.04)	<i>Corallina pilulifera</i> (13.40)	<i>Dumontia simplex</i> (13.87)	<i>Chondrus ocellatus</i> (13.59)
			<i>Chondrus ocellatus</i> (11.53)	<i>Sargassum thunbergii</i> (13.49)

Table 4. Mean biomass (g dry wt/m²), percent coverage (%) and various community Indices of macroalgal flora estimated at four study sites near Taean power plant in Korea

Community index	Intake	Discharge	Breakwater	Hakampo
Percent cover (%)	19.16	25.58	12.20	27.48
Dominance index (DI)	0.54	0.40	0.61	0.60
Richness index (R)	10.47	13.63	5.28	10.60
Evenness index (J')	0.59	0.55	0.60	0.51
Diversity index (H')	1.98	2.23	1.64	1.97
Chlorophyta/Phaeophyta (C/P)	2.50	1.50	1.00	2.33
Rhodophyta/Phaeophyta (R/P)	10.50	4.63	1.75	12.00
(R+C)/P	13.00	6.13	2.75	14.33

발전소 온배수는 해조류의 종 다양성을 단순화시키고 녹조류의 출현종수와 생물량의 증가로 군집구조의 변화를 가져오는 것으로 알려져 있다 (Kim and Huh, 1998; Kim and Ahn, 2005). Choi (2008)는 월성원자력발전소 배수구에서 출현한 29종 중에서 녹조류가 11종으로 녹조류의 종조성비율이 38%로서 취수구와 대조구(전촌리)의 19%에 비해 2배가 된다고 하였다. 본 연구가 수행된 태안화력발전소에서도 녹조류의 종조성비율은 온배수가 방출되기 전인 1993년에 12%에서 21% (현재)로 증가하였으며, 취수구 (18%)와 학암포 (15%)에 비해 높게 나타나서 온배수가 녹조류의 출현종수를 높이는 것으로 확인되었다. 또한, 녹조류의 생물량은 정점별로 3.00-12.93g/m²로 배수구에서 최대였으며 방파제에서 최소였다. 지역별로 구분해 보면, 녹조류의 생물량 비율은 발전소지역 (취수구, 배수구, 방파제)에서는 21.31-41.27%로서 대조구인 학암포 (10.54%)에 비해 높은 값을 보여 온배수가 녹조류의 생물량 구성비에 영향을 주는 것으로 확인되었다. 따라서, 태안화력발전소의 온배수는 배수구에서 녹조류의 출현종수와 생물량 구성비를 증가시켰고 배수구에서 약 1km 떨어진 취수구와 방파제에서는 녹조류의 생물량 구성비만 증가되었는데, 이러한 결과는 온배수의 영향이 거리에 따라 약해지므로 해조류의 종조성과 군집구조도 거리에 따라 달라진다는 Devanny (1980)의 결과와 일치한다.

해양에서 수온의 상승은 내열성 해조류 출현종수의 증가를 일으키는 것으로 알려져 있으며 (Carballo et al., 2002), 원자력발전소의 배수구에서는 방출되는 온배수에 의해 내열성 해조류의 출현 빈도가 높은 것으로 나타났다 (Kim et al., 1998; Kim et al., 2004). 내열종은 20°C 이상의 해역에서 서식이 가능한 해조류로서, Kim and Ahn (2005)은 동해안에 위치한 3개 원자력발전소 (울진, 월성, 고리)의 배수구에서 출현빈도가 높은 37종을 내열종 해조류로 기록하였다. Kim and Ahn (2005)의 연구에 따르면, 내열종은 배수구에서 16종 (28.07%), 취수구에서 11종 (33.33%), 방파제에서 8종 (53.33%)과 대조구 (학암포)에서 11종 (23.91%)이 출현하여 배수구에서 최대였고 방파제에서 최소였다. 또한, 본 연구에서 내열종 해조류의 생물량 비율도 대조구인 학암포 (49.41%)에 비해 발전소지역에서 61.43-83.11%로 높게 나타났다.

또한, 본 연구에서는 발전소 온배수가 좁은 해역에서 생물량의 감소와 더불어 우점종의 변화를 초래하여 해조류 군집구조가 바뀌는 것을 확인하였다. 발전소에서 온배수가 배출되기 이전 (1993년)에 배수구에서 생물량 (330.65g/m²)의 47% (155.45g/m²)를 차지하여 최우점종이던 작은구슬산호말 (Yoo and Kim, 2003b)이, 본 연구에서는 생물량 (60.67g/m²)의 18%로 감소하였으며, 제 2우점종이었던 지층이의 생물량도 전체 생물량의 29.50%에서 3.94%로 감소하였다. 반면에, 1993년에 정성적으로 종 기재만 되었던 개서실의 생물량이 본 연구에서 21.60% (13.11g/m²)를 차지하여 제 1우점종으로 조사되었다. 취수구에서도 전체 생물량의 49% (1993년)로 가장 우점하였던 지층이가 본 연구에서 관찰되지 않았으며, 소량으로 존재하던 애기우뚝가사리가 전체 생물량 (13.12g/m²)의 18.69%

(3.76g/m²)로서 우점하였다. 하지만, 대조구인 학암포에서는 1993년에 전체 생물량 (355.05g/m²)의 53.06%와 40.78%를 차지하던 작은구슬산호말과 지층이가 2006년에 실시한 본 연구에서는 각기 35.91% (24.99g/m²)와 24.53% (17.07g/m²)로 전체 생물량 (69.60g/m²)에 대한 비율이 약간 감소하였을 뿐 우점종으로 조사되었다. 따라서, 작은구슬산호말과 개서실 모두 내열종으로 분류되었지만 (Kim and Ahn, 2005), 개서실이 작은구슬산호말에 비해 열에 대한 내성이 강한 것으로 판단된다. 하지만, Kim and Lee (1980)는 고리원자력발전소 주변에서 발전소가동 전에 우점하던 개서실이 발전소가동 이후에 뚜렷한 감소를 보였다고 기록하여 향후 내열종으로 알려진 종들에 대해서 고온에 대한 생리적인 적응현상의 구명이 필요하다.

해조류의 계절별 주요종의 생물량 변화에서 배수구는 취수구, 방파제 및 학암포와 구분되는 특징을 보였다. 파래류는 취수구에서 봄에 비해 여름에 생물량이 높게 나타났으나 배수구에서는 반대되는 현상을 보였다. 또한, 작은구슬산호말은 방파제와 학암포에서는 봄에 최저 생물량 (6.21g/m²)을 보이다가 여름에 4배 이상 (24.86g/m²)으로 증가하였으나, 배수구에서는 봄 (0.90g/m²)과 여름 (4.80g/m²)에 낮은 생물량을 보이다가 가을에 생물량 (15.48g/m²)이 급격하게 증가하는 패턴을 보였다. 이처럼, 파래와 작은구슬산호말의 생물량 증가 패턴이 취수·대조구와 배수구에서 다르게 나타나는 것은 고수온인 여름에 고온의 온배수가 첨가되면 종에 따라서는 생장이 억제되는 것으로 사료된다. 월성원자력발전소의 배수구에서 봄과 여름에 파래류, 구멍갈파래, 부쟁말과 애기돌가사리에서 탈색이 일어났다고 하였으며 가을에 해조류의 생물량 감소가 일어난다고 하였는데 (Choi, 2008), 본 연구의 경우 배수구에서 여름에 작은구슬산호말의 탈색과 사멸이 관찰되어 온배수에 의한 작은구슬산호말의 생장 억제가 일어난 것으로 판단된다.

Choi (2008)는 월성원자력발전소에서 온배수에 대한 해조류 군집연구에서 우점도지수, 다양도지수, 풍도지수, 균등도지수 등의 군집지수가 배수구와 대조구를 구분할 수 있는 지표로 이용할 수 있다고 하였다. 본 연구가 수행된 태안화력발전소의 경우에는 배수구의 출현종수 및 생물량이 취수구와 방파제 및 대조구와 비교할 때 높거나 비슷한 값을 보임으로써 이들을 이용하여 계산한 군집지수에서 온배수의 영향은 관찰되지 않았다. 또한, Choi (2008)는 해조류의 생태지수인 C/P, R/P 및 (R+C)/P값을 이용하여 원자력발전소에서 취수구, 배수구 및 대조구를 구분하는 지표로 사용하기 어렵다고 하였는데, 본 연구에서도 취수구, 배수구 및 학암포의 해조상이 모두 열대성으로 구분되어 온배수의 영향 여부를 구별할 수 없었다. 따라서, 해조류의 군집지수는 출현종수와 생물량의 영향을 많이 받기 때문에 취수구·대조구에 비해 배수구에서 출현종수와 생물량이 많은 태안화력발전소의 경우에는 온배수의 영향을 나타내는 지표로 사용이 불가능하며, C/P, R/P와 (R+C)/P값은 해조류 출현종수가 많지 않은 해역에서는 출현한 소수의 녹조류와 갈조류에 의해 이들 값의 변화폭이 크기 때문에 온배수의 영향을 파악하기가 어렵다는 것이 확인되었다.

일반적으로 원자력발전소 배수구의 해조류 생물량은 대조구에 비해 낮은 것으로 알려져 있다(Kim and Ahn, 2006; Choi, 2008). 예를 들면, 동해안의 3개 원자력발전소 배수구의 평균 생물량은 취수구 및 대조구에 비해 낮게 나타났으며, 월성원자력발전소의 경우 배수구의 생물량 (127.32g/m^2)은 취수구 (301.23g/m^2) 및 대조구 (305.14g/m^2)에 비해 58.27%와 57.74% 낮게 나타났다(Kim and Ahn, 2005). 서해안의 영광원자력발전소 배수구의 해조류의 생물량은 62.52g/m^2 로서 대조구 5개의 평균생물량 (156.43g/m^2)에 비해 67.31%가 낮게 나타남으로써 발전소 온배수는 생물량을 감소시키는 것으로 확인되었다(Kim and Huh, 1998). 본 연구에서는 배수구의 연평균 생물량이 60.67g/m^2 로 대조구 생물량 (69.60g/m^2)에 비해 12.83% 정도 낮게 나타났고 1993년에 수행된 연구에서도 배수구의 생물량은 330.65g/m^2 로서 분점도 (학암포 인근)의 생물량 355.05g/m^2 에 비해 6.87%가 낮은 것으로 확인되어 태안화력발전소 배수구의 생물량은 다른 원자력발전소 배수구의 생물량에 비해 매우 높은 경향을 보였다.

결론적으로, 태안화력발전소 인근해역에서 출현한 해조류의 종수는 발전소 건설 이전인 1987년에는 115종(Yoo and Kim, 2003a), 발전소 건설이 완공되었으나 가동되기 직전, 즉 온배수의 영향이 없는 1993년에는 97종(Yoo and Kim, 2003b), 발전소가 가동중인 2006년(본 연구)에는 72종으로 감소하였다. 따라서, 발전소의 건설로 인한 토사의 유출로 해수의 탁도 증가 및 발전소 가동에 의한 온배수의 영향은 해조류 출현종의 감소를 가져오는 것으로 확인되었다. 또한, 태안화력발전소의 온배수는 녹조류의 종수와 생물량이 증가하고 내열종 해조류의 출현종수와 그들의 생물량을 증가시키며, 우점종의 변화를 초래하는 것으로 나타났다. 하지만, 태안화력발전소에서 해조상의 수평분포를 나타내는 C/P, R/P 및 (R+C)/P 값과 우점도지수, 종다양도지수 및 풍도지수 등의 군집지수는 취수구, 배수구 및 대조구와 구분이 되지 않아서 온배수의 영향을 반영하는 지표로 사용하기가 어려울 것으로 판단된다. 따라서, 태안화력발전소 인근의 해조군집에서는 해조류의 출현종수, 녹조류와 내열종의 출현종수 및 생물량 비율이 온배수의 영향을 가장 잘 반영하는 지표로 판단되었다. 하지만, 우리나라 인근의 울진, 월성, 고리, 및 영광원자력발전소의 배수구와는 달리 태안화력발전소의 배수구에서 생물량과 출현종수가 취수구에 비해 높게 나타나는 원인은 앞으로 밝혀야 할 과제로 남아있다.

사 사

본 논문은 2008학년도 원광대학교 교비지원에 의해서 수행되었으며, 연구를 위해 현장 채집과 분석을 도와준 원광대학교 해양생물학실험실 구성원에게 감사한다.

참 고 문 헌

Abbott, I.A. and W.J. North. 1971. Temperature influences on floral composition in California coastal waters. *Proc. Intl. Seaweed Symp.*, 7, 72-79.

- strial Plant Ecology. The Benjamin/Cummings Pub. Co., Inc., 1-634.
- Bolton, J.J., F. Leliaert, O.D. Clerck, R.J. Anderson, H. Stegenga, H.E. Engledow and E. Coppejans. 2004. Where is the western limit of the tropical Indian Ocean seaweed flora? An analysis of intertidal seaweed biogeography on the east coast of South Africa. *Mar. Biol.*, 144, 51-59.
- Bray, J.R. and J.T. Curtis. 1957. An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin. *Ecol. Monogr.*, 27, 325-349.
- Breeman, A.M. and H. Pakker. 1994. Temperature ecotypes in seaweeds: adaptive significance and biogeographic implications. *Bot. Mar.*, 37, 171-180.
- Carballo, J.L., C. Olabarria and T.G. Osuna. 2002. Analysis of four macroalgal assemblages along the Pacific Mexican coast during and after the 1997-98 El Niño. *Ecosystems*, 5, 749-760.
- Cheney, D.P. 1977. R & C/P-A new and improved ratio for comparing seaweed floras. *Suppl. J. Phycol.*, 13, 129.
- Choi, H.G. 2008. Effects of thermal effluents from Wolsong nuclear power plant on macroalgal composition and community structure. *Algae*, 22, 151-162.
- Clarke, K.R. and R.N. Gorley. 2006. *PRIMER V6: User Manual/Tutorial*. PRIMER-E Ltd, Plymouth, 1-190.
- Devlinny, J.S. 1980. Effects of thermal effluents on communities of benthic marine macroalgae. *J. Environ. Manage.*, 11, 225-42.
- Feldmann, J. 1937. Recherches sur la végétation marine de la Méditerranée. La cote des Alpes. *Rev. Algol.*, 10, 1-339.
- Fowler, J. and L. Cohen. 1990. *Practical Statistics for Field Biology*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1-227.
- Kang, J.W. 1968. *Illustrated Encyclopedia of Fauna and Flora of Korea*. Vol. 8 (Marine algae). Ministry of Education, Korea, 1-465.
- Kim, Y.H. and J.K. Ahn. 2005. Ecological characteristic of marine algal communities at the discharge canals of three nuclear power plants on the east coast of Korea. *Algae*, 20, 217-224.
- Kim, Y.H. and J.K. Ahn. 2006. Effects of heated effluents on the intertidal macroalgal community near Wolsong, the east coast of Korea. *Algae*, 21, 453-461.

- Kim, Y.H., J.K. Ahn, H.D. Yoon and M.A. Jang. 2007. Effects of heated effluents on the intertidal macroalgal community near Gori nuclear power plant. *Algae*, 22, 297-304.
- Kim, Y.H., H.M. Eum and Y.S. Kang. 1998. Qualitative and quantitative analysis of warm tolerant benthic marine algae in Korea. *Algae*, 13, 213-226.
- Kim, Y.H., J.K. Ahn, J.I. Lee and H.M. Eum. 2004. Effects of heated effluents on the intertidal macroalgal community near Uljin, the east coast of Korea. *Algae*, 19, 257-270.
- Kim, Y.H. and S.I. Choi. 1995. Effects of cooling system at power plant on marine algal vegetation. *Korean J. Phycol.*, 10, 121-141.
- Kim, Y.H. and S.H. Huh. 1998. Species composition and biomass of marine algal community in the vicinity of Yonggwang nuclear power plant on the west coast of Korea. *J. Korean Fish. Soc.*, 31, 186-194.
- Kim, Y.H. and J.H. Lee. 1980. A study on the marine algae at the coast of Kori nuclear power plant. *J. Plant. Biol.*, 23, 3-10.
- Koh, N.P. 1990. An ecological study of resources of marine plants in Geomundo Islands. *Algae*, 5, 1-37.
- Lambhead, P.J.D., H.M. Platt and K.M. Shaw. 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.
- Lee, K.H., H.I. Yoo and H.G. Choi. 2007. Seasonal community structure and vertical distribution of medicinal seaweeds at Kkotji in Taean peninsula, Korea. *Algae*, 22, 209-219.
- Lee, Y.P. and S.Y. Kang. 2002. A Catalogue of the Seaweeds in Korea. Cheju National University Press, Jeju, 1-662.
- Lindstrom, S.C. 2009. The biogeography of seaweeds in southeast Alaska. *J. Biogeogr.*, 36, 401-409.
- Lobban, C.S. and P.J. Harrison, 1997. *Seaweed Ecology and Physiology*. Cambridge University Press, New York, 1-366.
- Lüning, K. 1990. *Seaweeds: Their Environment, Biogeography and Ecophysiology*. Wiley, New York, 1-527.
- 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.
- Mueller-Dombois, D. and H. Ellenberg. 1974. *Aims and Methods of Vegetation Ecology*. John Wiley and Sons, New York, 1-547.
- Orfanidis, S., P. Panayotidis and N. Stamatis. 2001. Ecological evaluation of transitional and coastal waters: a marine benthic macrophytes-based model. *Mediterr. Mar. Sci.*, 2, 45-65.
- Patrick, R. 1974. Effects of abnormal temperatures on algal communities. In: Gibbons, J.W. and R.R. Sharitz. (eds), *Thermal Ecology*. Technical Information Center, U.S. Atomic Energy Commission, 335-349.
- Saito, Y. and S. Atobe. 1970. Phytosociological study of intertidal marine algae. I. *Bull. Fac. Fish., Hokkaido Univ.*, 21, 37-67.
- Segawa, S. 1956. *Colored Illustrations of Seaweeds of Japan*. Hoikusha, Osaka, 1-195.
- Snoeij, P.J.M. and I.C. Prentice. 1989. Effects of cooling water discharge on the structure and dynamics of epilithic algal communities in the northern Baltic. *Hydrobiologia*, 184, 99-123.
- Ugarte, R.A. and G. Sharp. 2001. A new approach to seaweed management in Easter Canada: the case of *Ascophyllum nodosum*. *Cah. Biol. Mar.*, 42, 63-70.
- Vadas, R.L. 1979. Abiotic disease in seaweeds: thermal effluents as causal agents. *Experimentia*, 35, 435-437.
- Yi, S.K. 1987. Effects of cooling water system of power plant on marine organisms. *J. Korean. Fish. Soc.*, 20, 381-390.
- Yoo, J.S. and Y.H. Kim. 2003a. Community dynamics of the benthic marine algae in Hakampo, the western coast of Korea. *Korean J. Environ. Biol.*, 21, 428-438.
- Yoo, J.S. and Y.H. Kim. 2003b. Ecological study of the marine algal community at the coast of Taean thermal power plant, Korea. *Algae*, 18, 311-320.

2009년 5월 18일 접수

2009년 7월 1일 수정

2009년 8월 14일 수리