

## 신고리원자력발전소 주변 해역 조간대의 해조상 및 군집구조

한수진 · 장재길 · 황용훈 · 손민호 · 최한길\*

해양생태기술연구소, <sup>1</sup>원광대학교 생명과학부/환경과학연구소

# Marine Algal Flora and Community Structure of the Intertidal Zone around Shingori Nuclear Power Plant, Korea

Su Jin Han, Jae Gil Jang, Youg Hun Hwang, Min Ho Son and Han Gil Choi<sup>1\*</sup>

Marine Eco-technology institute Co., Ltd., Busan 48520, Korea

<sup>1</sup>Faculty of Biological Science and Institute for Environmental Science, Wonkwang University, Iksan 54538, Korea

Marine algal flora and community structures were examined seasonally at three sites around the Shingori Nuclear Power Plant, Korea from February to November 2016. A total of 76 species were identified, including 9 green, 14 brown and 53 red algae. The greatest number of species occurred at Daesongri (51 species) followed by Sinamri (43 species) and at the discharge area (38 species) during the study period. Of the 76 seaweeds, 59 annuals and 17 warm tolerant species were recorded. Annual average biomass in dry weight varied from 168.02 g/m<sup>2</sup> at the discharge area to 222.53 g/m<sup>2</sup> at Sinamri. The coarsely branched form was the dominant functional form of seaweeds at the three sites. Seaweed community structures at the discharge site were distinguishable by decreasing species richness, biomass, species diversity index, richness index, and evenness index. The ratio of warm tolerance species and the dominance index values were remarkably higher at the discharge than those at the other sites.

Key words: Algal flora, Biomass, Warm tolerant species, Community, Diversity

## 서 론

해조류는 연안생태계에서 일차생산자, 경쟁자 및 생태계 설계자로서 중요한 생태적 서비스를 제공하며, 상위 먹이사슬 단계에 있는 해양생물의 종다양성, 풍도 및 어장 형성에 많은 영향을 준다(Whitaker et al., 2010; Harley et al., 2012; Janiak and Whitlatch, 2012; Satheesh and Wesley, 2012; Liang et al., 2014). 하지만, 조간대 해조류의 종조성과 군집구조는 주로 염분, 수온, 조도와 대기노출 시간 같은 무생물적 환경요인에 의해 조절되며, 환경상태가 상대적으로 안정된 조하대에서 이들의 풍도와 수직분포는 초식압 및 경쟁과 같은 생물적 요인에 의해 결정된다(Graham and Wilcox, 2000; Babitha and Subramanian, 2016). 이러한 다양한 환경요인 중에서 해조류의 지리적 분포와 풍도에 영향을 미치는 가장 중요한 요인은 수온으로 알려져 있다(Yoo et al., 2009; Babitha and Subramanian, 2016).

국내에서는 20세기 후반부터 해수를 발전소의 냉각수로 활용하기 위하여, 많은 연안에 원자력발전소 및 화력발전소가 건설되었으며, 온배수가 방출된 연안은 주변해역과 구별되는 해조

류의 종조성, 생물량 및 군집구조를 가지는 것으로 알려져 있다(Steinbeck et al., 2005; Kim et al., 2007; Choi, 2008). 원자력발전소의 온배수가 주변 해조류 군집에 미치는 영향에 관한 선행연구는 1978년에 최초로 건설된 고리원자력발전소의 주변 해역에 대한 연구를 시작으로(Kim and Lee, 1980), 해조상 및 군집구조에 관한 연구(Kim et al., 1992; Kim and Huh, 1998; Choi, 2008), 내열종 해조류 및 생물량에 관한 연구(Kim, 1986; Kim et al., 2004; Kim and Ahn, 2005; Kim et al., 2007)가 있다.

하지만, 신고리원자력발전소의 경우 신고리 원전 1호기가 가동되기 시작한 2011년 이후로 신고리 원전 4호기가 준공 예정에 있으나(KHNP, <http://www.khnp.co.kr>), 해조상 및 군집구조에 대한 연구는 없는 실정이다. 따라서, 본 연구는 신고리원자력발전소의 배수구 및 대조구(신암리, 대송리) 해안에 서식하는 해조류의 종조성, 우점종, 수직분포와 계절적 생물량 변화를 비교하여 온배수가 해조류 군집구조에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2017.0319>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Korean J Fish Aquat Sci 50(3) 319-325, June 2017

Received 5 April 2017; Revised 1 May 2017; Accepted 2 May 2017

\*Corresponding author: Tel: +82. 63. 850. 6579 Fax: +82. 63. 857. 8837

E-mail address: hgchoi@wku.ac.kr

## 재료 및 방법

해조류는 울산광역시 울주군에 위치한 신고리 1, 2호기의 배수구(35°20'N, 129°19'E), 배수구에서 약 2 km 떨어진 신암리(35°20'N, 129°19'E)와 발전소 온배수의 영향이 거의 없을 것으로 판단되는 대송리(35°21'N, 129°21'E)를 대조구로 지정하여 2016년 2월부터 11월까지 계절별로 정량 및 정성 채집하였다(Fig. 1). 정량조사는 조간대 상, 중, 하부에 각 2-3개의 방형구(50 cm × 50 cm)를 무작위적으로 놓고 방형구내에 존재하는 모든 해조류를 끝갈로 전량 채집하였으며, 해조상을 파악하기 위하여 다양한 기질과 조위에 서식하는 모든 해조류를 정성 채집하였다. 채집된 해조류는 포르말린-해수용액(5-10%)으로 현장에서 고정시켜 실험실로 운반한 후 현미경을 사용하여 분류 및 동정하였고, 출현종의 목록 및 국명은 국가 생물종 목록집(Kim et al., 2013)에 따랐으며, 내열종은 Kim and Ahn (2005)에 의해 결정하였다. 해조류의 기능형은 출현종의 외부형태 및 내부구조에 따라 엽상형, 사상형, 성긴분기형, 다육질형, 유절산호말형, 각상형의 6개 그룹으로 구분하고(Littler and Littler, 1984), 다시 생태학적상태그룹(Ecological State Group, ESG)인 ESG I(다육질형, 유절산호말형, 각상형)과 ESG II(엽상형, 사상형, 성긴분기형)로 분류하였다(Orfanidis et al., 2003).

정량 채집된 해조류는 담수로 수 회 세척하여 모래와 불순물을 제거하고, 동정한 후 60°C로 설정된 건조기에서 7일간 건조하여 건조량을 측정하였고 단위면적당 생물량(g dry wt./m<sup>2</sup>)으로 환산하였다. 계절별로 출현한 해조류의 평균 생물량과 출

현종수를 근거로 하여 풍도지수(richness index, R), Shannon's 다양도지수(diversity index, H')와 균등도지수(evenness index, J)를 계산하였으며(Margalef, 1958; Fowler and Cohen, 1990), 우점도지수(dominance index, DI)는 군집 내에서의 생물량 순서에 따라 제1, 2 우점종을 선택하고, 2종의 생물량 합에 대한 총 생물량의 비율로 산출하였다(McNaughton, 1967; Lee et al., 1983). 출현한 해조류의 우점도는 *k*-dominance 곡선으로 비교하였으며(Lambhead et al., 1983), 군집지수의 산출 및 도식화에는 PRIMER version 6 (Clarke and Gorley, 2006)를 이용하였다. 또한, 원자력발전소의 온배수가 해조상의 변화에 미치는 영향을 파악하기 위해 정성 채집된 해조류를 분류 및 동정한 후 출현종수로 갈조류에 대한 녹조류의 비(C/P), 갈조류에 대한 홍조류의 비(R/P), 갈조류에 대한 녹조류와 홍조류의 비로 (R+C)/P를 구하였다(Feldmann, 1937; Segawa, 1956; Cheney, 1977).

## 결 과

### 종조성

본 연구기간에 신고리원자력발전소의 배수구, 신암리와 대송리 해안에서 출현한 해조류는 76종으로서 녹조류 9종, 갈조류 14종, 홍조류 53종이었으며, 홍조류가 전체 출현종수의 69.74%를 차지하여 녹조류와 갈조류에 비해 출현빈도가 높았다. 계절별 출현종수는 춘계에 46종(녹조류 6종, 갈조류 10종, 홍조류 30종)으로 가장 높았으며, 하계에 28종(녹조류 3

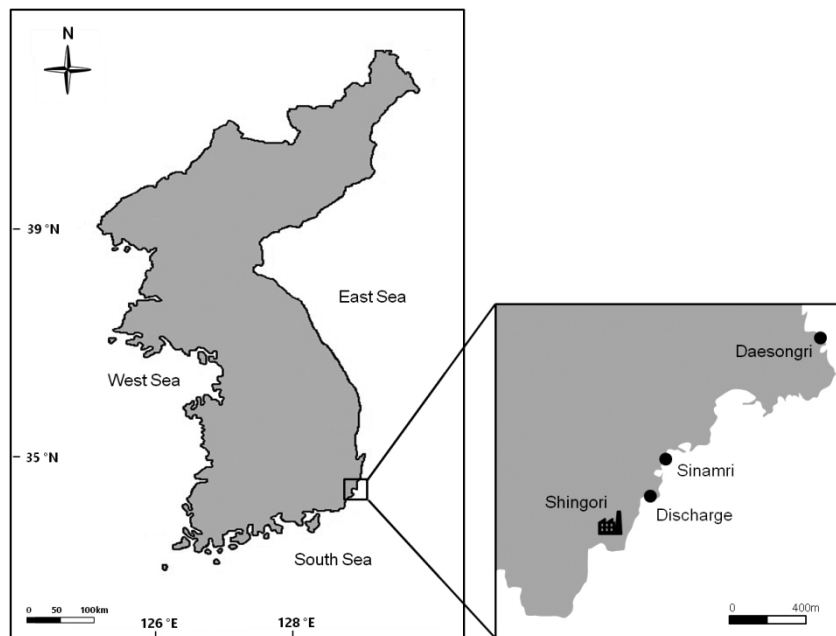


Fig. 1. A map of three study site and the location of Shingori nuclear power plant in Korea.

중, 갈조류 2종, 홍조류 23종), 추계에 35종(녹조류 2종, 갈조류 8종, 홍조류 25종), 동계에 37종(녹조류 6종, 갈조류 6종, 홍조류 25종)으로 하계에 가장 적었다. 배수구에서 출현한 해조류는 총 38종(녹조 4종, 갈조 7종, 홍조 27종)이며, 홍조류가 71.05%로 가장 높았고, 계절별 출현종은 12-20종으로 동계에 최대였고 추계에 최소였다(Table 1). 배수구에서는 구멍갈파래(*Ulva australis*), 지층이(*Sargassum thunbergii*), 작은구슬산호말(*Corallina pilulifera*), 참보라색우무(*Symphyclocladia latiuscula*)가 연중 출현하였다. 신암리에서는 녹조류 5종, 갈조류 10종, 홍조류 28종으로 총 43종이 동정되었으며, 홍조류가 전체 출현종의 65.12%로 가장 높았고, 계절별 출현종수는 12-24종으로 춘계에 최대였고 하계에 최소였다(Table 1). 신암리 해안에서 연중 출현한 해조류는 돌가사리(*Chondracanthus tenellus*), 진두발(*Chondrus ocellatus*), 작은구슬산호말, 쌍발이서실(*Laurencia okamurae*)로 나타났다. 대송리에서 출현한 해조류는 총 51종(녹조 4종, 갈조 12종, 홍조 35종)이며, 홍조류가 68.63%로 가장 높았고, 계절별 출현종은 15-28종으로 춘계에 최대였고 하계에 최소였다(Table 1). 대송리 해안에서는 잔금분홍잎(*Acrosorium polyneurum*), 진두발, 작은구슬산호말, 참보라색우무가 연중 관찰되었다.

내열성 해조류는 배수구에서 12종, 신암리에서 15종, 대송리에서 10종이 출현하여 내열성 해조류의 비율은 신암리에서 34.88%로 가장 높았고, 배수구에서 31.58%, 대송리에서 19.61%의 순으로 나타났다(Table 2). 분류군별 내열종의 비율은 홍조류가 9종(52.94%)로 최대였으며, 모든 정점에서 출현한 내열종은 구멍갈파래, 불레기말(*Colpomenia sinuosa*), 팽생이모자반(*Sargassum horneri*), 부챗살(*Ahnfeltiopsis flabelliformis*), 개서실(*Chondria crassicaulis*), 작은구슬산호말과 참가시우무(*Hypnea charoides*)로 나타났다.

기능형 및 생태학적 그룹

본 연구기간에 3개 정점에서 출현한 해조류 76종은 성긴분기형 31종(40.79%), 엽상형 15종(19.74%), 사상형 11종(14.47%), 다육질형 11종(14.47%), 유절산호말형 5종(6.58%), 각상형 3종(3.95%)로 구분되어, 성긴분기형이 가장 우점하는 기능형군으로 확인되었다(Table 3). 정점별로는 배수구에서 성긴분기형, 엽상형, 사상형, 다육질형, 유절산호말형, 각상형의 순서를 보였으며, ESG I에 속하는 종은 11종(28.95%), ESG II에 속하는 종은 27종(71.05%)으로 나타났다. 신암리에서는 성긴분기형, 엽상형, 다육질형, 사상형의 순서로 각상형 해조류는

Table 1. The number of macroalgal species observed at the Shingori nuclear power plant in Korea

Taxon	Discharge					Sinamri					Daesongri					To
	Wi	Sp	Su	Au	To	Wi	Sp	Su	Au	To	Wi	Sp	Su	Au	To	
Chlorophyta	4	2	1	1	4	2	3	2	1	5	1	3	2	1	4	9
Phaeophyta	4	2	1	5	7	4	5	1	3	10	4	9	1	4	12	14
Rhodophyta	12	13	13	6	27	15	16	9	17	28	16	16	12	15	35	53
Total	20	17	15	12	38	21	24	12	21	43	21	28	15	20	51	76

Wi, Winter; Sp, Spring; Su, Summer; Au, Autumn; To, Total

Table 2. A list of warm-tolerant seaweeds occurred at three study site near Shingori nuclear power plant in Korea

Site	Chlorophyta	Phaeophyta	Rhodophyta	Total
Discharge	<i>Ulva linza</i> , <i>U. australis</i>	<i>Colpomenia sinuosa</i> , <i>Sargassum horneri</i> , <i>S. micracanthum</i>	<i>Ahnfeltiopsis flabelliformis</i> , <i>Caulacanthus ustulatus</i> , <i>Chondria crassicaulis</i> , <i>Corallina officinalis</i> , <i>Corallina pilulifera</i> , <i>Gelidiophycus divaricatus</i> , <i>Hypnea charoides</i>	12
Sinamri	<i>U. compressa</i> , <i>U. conglobata</i> , <i>U. linza</i> <i>U. australis</i>	<i>C. sinuosa</i> , <i>S. fulvellum</i> , <i>S. horneri</i>	<i>A. flabelliformis</i> , <i>C. ustulatus</i> , <i>C. crassicaulis</i> , <i>C. officinalis</i> , <i>C. pilulifera</i> , <i>Gelidium elegans</i> , <i>Grateloupia filicina</i> , <i>H. charoides</i>	15
Daesongri	<i>U. conglobata</i> , <i>U. australis</i>	<i>C. sinuosa</i> , <i>S. horneri</i> , <i>S. micracanthum</i>	<i>A. flabelliformis</i> , <i>C. crassicaulis</i> , <i>C. pilulifera</i> , <i>G. filicina</i> , <i>H. charoides</i>	10

Table 3. Seasonal variations in the number of functional form seaweeds occurred at three study site near Shingori nuclear power plant in Korea

F-form	Discharge					Sinamri					Daesongri				
	Wi	Sp	Su	Au	To	Wi	Sp	Su	Au	To	Wi	Sp	Su	Au	To
S (ESG II)	3	2	1	3	6	3	4	2	3	8	2	9	4	6	13
F (ESG II)	3	1	2	1	5	1	1	1	1	3	3	3	1	0	6
CB (ESG II)	9	8	8	5	16	12	13	6	14	22	12	9	8	8	21
TL (ESG I)	3	2	2	2	5	3	5	2	2	8	2	6	1	4	8
JC (ESG I)	2	2	2	1	4	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2
C (ESG I)	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
No. of ESG II	15	11	11	19	27	16	18	9	18	33	17	21	13	14	40
No. of ESG I	5	6	4	3	11	4	7	2	6	10	5	6	3	3	11
Total	20	17	15	12	38	21	28	15	20	43	21	24	12	21	51

Wi, Winter; Sp, Spring; Su, Summer; Au, Autumn; To, Total; S, Sheet form; F, Filamentous form; CB, Coarsely Branched form; TL, Thick Leathery form; JC, Jointed Calcareous form; C, Crustose form; ESG, Ecological state group.

출현하지 않았다. 신암리 해안에서의 ESG I에 속하는 종은 10종(23.26%), ESG II에 속하는 종은 33종(76.74%)으로 나타났다. 대송리에서는 성긴분기형, 엽상형, 다육질형, 사상형, 유절 산호말형, 각상형의 순서로 나타났으며, ESG I에 속하는 종은 11종(21.57%), ESG II에 속하는 종은 40종(78.43%)으로 특히 엽상형의 비율이 25.49%로 다른 정점에 비해 높게 나타났다.

계절별로 ESG II의 비율은 배수구에서 64.71-75.00%로 동계와 추계에서 가장 높았고, 신암리에서 75.00-85.71%, 대송리에서 70.00-86.67%로 각각 추계와 하계에서 최대로 나타났다.

생물량 및 우점종

신고리원자력발전소 주변 해역(배수구, 신암리, 대송리)의 조간대에 서식하는 해조류의 연평균 생물량(g dry wt./m<sup>2</sup>)은 200.49 g/m<sup>2</sup>이고, 정점별로는 168.02-222.53 g/m<sup>2</sup>으로 대조구인 신암리에서 최대였고, 배수구에서 최소로 나타났다(Fig. 2).

각 정점의 계절별 해조류의 생물량 및 주요 구성종을 보면, 배

수구의 생물량은 18.16-300.56 g/m<sup>2</sup> (평균 168.02 g/m<sup>2</sup>)으로 봄에 최대였고, 녹조류인 구멍갈파래는 여름에, 갈조류인 지층이가 겨울-봄에, 홍조류인 작은구슬산호말과 참보라색우무는 겨울-여름에 높은 생물량을 보였다. 신암리에서는 계절에 따라 89.12-450.17 g/m<sup>2</sup> (평균 222.53 g/m<sup>2</sup>)으로 봄에 최대였으며, 구멍갈파래(겨울-여름), 툃과 미역(봄), 애기가시덤불(여름, 가을), 작은구슬산호말(겨울, 봄)이 계절별로 높은 생물량을 보였다. 대조구인 대송리에서 계절별 생물량은 61.80-549.54 g/m<sup>2</sup> (평균 210.91 g/m<sup>2</sup>)로 배수구와 마찬가지로 봄에 최대였다. 생물량의 주요 구성종은 연중 높은 생물량을 나타낸 홍조류 작은구슬산호말로 확인되었으며, 참보라색우무는 겨울-봄에, 그리고 왜모자반(*Sargassum yezeense*), 미역(*Undaria finnatifida*), 미끌도박(*Grateloupia turuturu*)은 봄에 많은 생물량을 보였다.

해조류의 연평균 생물량과 종다양성을 근거로 k-dominance 곡선을 도식화하면, 배수구에서는 우점종 3종(지층이, 참보라색우무, 작은구슬산호말)이 전체 생물량의 80% 이하를 차지하고, 신암리(작은구슬산호말, 구멍갈파래, 애기가시덤불)와 대송리(작은구슬산호말, 참보라색우무, 미끌도박)에서는 60% 이하를 차지하여, k-dominance곡선에서 나타난 정점별 종다양성은 신암리, 대송리, 배수구의 순서를 보였다(Fig. 3).

군집지수

해조류의 생물량과 출현종수로 산출된 연평균 군집지수를 보면, 배수구에서 제 1, 2 우점종인 지층이(77.78 g/m<sup>2</sup>)와 참보라색우무(28.89 g/m<sup>2</sup>)가 전체 생물량(168.02 g/m<sup>2</sup>)의 63.49%를 차지하여 우점도지수(DI)가 0.63으로 최대였고, 신암리에서는 제 1, 2 우점종인 작은구슬산호말(40.19 g/m<sup>2</sup>)과 구멍갈파래(30.31 g/m<sup>2</sup>)가 전체 생물량(222.53 g/m<sup>2</sup>)의 31.68%를 차지하여 0.32로 최소로 나타났다(Table 4). 연구기간에 4계절 출현종수와 평균 생물량을 이용한 풍도지수(R)는 51종이 출현한 대송

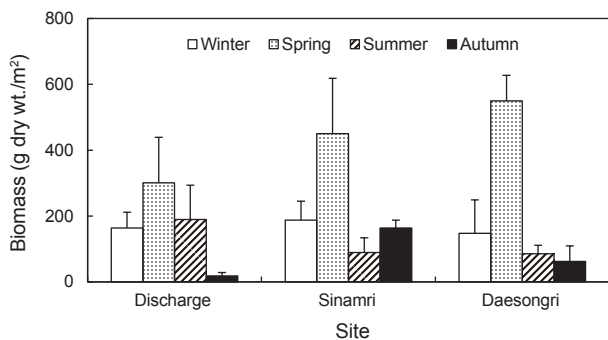


Fig. 2. Seasonal variations in seaweed biomass (g dry wt./m<sup>2</sup>) at three study site near Shingori nuclear power plant in Korea. Bars show standard errors (n=2-3 replicates)

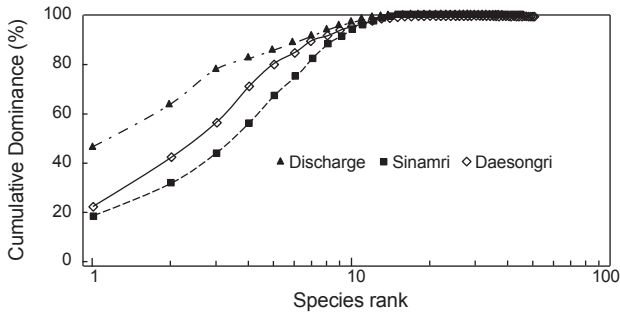


Fig. 3. K-dominance curves (X-axis logged) for average seaweed biomass at three study site near Shingori nuclear power plant in Korea.

리에서 최대(7.42)였고, 38종이 출현한 배수구에서 5.68로 최소였으며, 균등도지수(J)는 해조류의 생물량 차이가 크지 않고, 우점도 지수가 낮았던 신암리에서 0.62로 높았다. 풍도와 균등도에 의해 결정되는 종다양도지수(H')는 신암리에서 가장 높은 값(2.36)을 보였으며, 대송리(2.18), 배수구(1.76)의 순서로 나타났다(Table 4). 해조상의 지역적 특성을 나타내는 C/P값은 배수구에서 0.57로 최대였고, 대송리에서 0.43으로 최소였다. R/P값과 (R+C)/P값은 C/P값과 유사하게 배수구에서 각각 3.86, 4.43으로 최대로 나타났다.

**고 찰**

원자력발전소 배수구 인근 해역은 온배수의 영향이 상대적으로 적은 대조구에 비해 해조류의 식생이 빈약한 것으로 알려져 있다(Choi, 2008; Yoo et al., 2009). 서해안에 위치한 영광 원자력발전소의 배수구에서 해조류 출현종수는 18종으로 대조구인 대신리와 가마미(36종)의 50% 수준이었으며(Kim and Huh, 1998), 동해안에 위치한 울진원자력발전소의 경우, 배수구 인근 연안에서 해조류 출현종수는 취수구와 대조구에 비해 51-85% 수준으로 낮게 나타났다(Kim and Choi 1995; Kim et al., 2008). 또한, 장기간(1992-2000년) 해조류 모니터링 연구 결과, 동해안의 3개 원자력발전소(고리, 월성, 울진)에서 평균 출현종수는 배수구에서 15-17종으로 대조구의 36-50종에 비해 30-47% 수준으로 알려졌다(Kim and Ahn, 2005). 또한, 고리원자력발전소의 경우, 약 6년 동안(2001-2006년)의 평균 출현종수는 배수구에서 14종, 대조구에서 40종으로 나타나 배수구의 종 다양성이 대조구보다 낮은 것으로 나타났다(Kim et al., 2007). 본 연구기간에 신고리원자력발전소 배수구에서 해조류 출현종수는 38종으로 인근에 위치한 신암리(43종)와 유사하였으나, 대조구인 대송리(51종) 보다 낮은 것으로 나타났는데, 이처럼 배수구에서 출현종수가 적은 것은 온배수가 해조류의 종 다양성을 감소시키는 것으로 사료된다.

해양에서 발전소 온배수로 인한 수온 상승은 해조류 종조성

Table 4. Average biomass (g dry wt./m<sup>2</sup>) and various community indices of seaweeds at three sites near Shingori nuclear power plant in Korea

Community indices	Discharge	Sinamri	Daesongri
Biomass (g/m <sup>2</sup> )	168.02	222.53	210.91
Dominance index (DI)	0.63	0.32	0.42
Richness index (R)	5.68	6.33	7.42
Evenness index (J')	0.48	0.62	0.55
Diversity index (H')	1.76	2.36	2.18
Chlorophyta/Phaeophyta (C/P)	0.57	0.50	0.43
Rhodophyta/Phaeophyta (R/P)	3.86	2.80	2.92
(R+C)/P	4.43	3.30	3.25

C, Chlorophyta; P, Phaeophyta; R, Rhodophyta.

에서 내열성 종들의 증가와 이들의 출현 빈도가 높아지는 것으로 나타났다(Carballo et al., 2002; Kim et al, 2004). 내열종(Warm tolerant species)은 수온이 20℃가 넘는 해역에서 서식 가능한 해조류로서(Abbott and North, 1971), Kim and Ahn(2005)은 국내 원자력발전소 배수구에서 출현빈도가 높은 해조류 37종을 내열종으로 구분하였으며, 그 중 3개 원자력 발전소의 배수구에서 50%이상의 출현빈도를 보인 납작파래(*Ulva compressa*), 부챗말(*Padina arborescens*), 고리마디게발(*Amphiroa zonata*)과 부챗살의 4종을 우리나라의 대표적인 내열종 해조류로 분류하였다. 동해안 3개 원자력발전소에서 출현한 내열성 해조류는 배수구에서 16종(28.07%), 대조구에서 11종(23.91%)으로 확인되었으며(Kim and Ahn, 2005), 월성원자력발전소의 배수구와 대조구에서는 13종이 출현하였으나, 내열성 종의 비율이 44.83%와 12.87%로 배수구에서 높았다(Choi, 2008). 또한, 본 연구에서 내열성 해조류의 출현비율도 대조구인 대송리(19.61%)에 비해 배수구(31.58%)에서 높게 나타났으며, 배수구에서 반경 2 km 이내에 위치한 신암리에서도 34.88%로 높은 비율을 보였다.

Orfañidis et al. (2003)은 안정된 환경에서 생태학적상태그룹 I (ESG I)에 속하는 다육질형, 유절산호말형 및 각상형의 해조류가 주로 서식하고, 환경적 스트레스가 심한 교란 혹은 오염지역에서는 ESG II (엽상형, 사상형, 성긴분기형) 해조류가 우점한다고 하였다. 월성원자력발전소 배수구에서는 ESG II에 속하는 해조류가 97%로 환경적 스트레스가 매우 심각한 것으로 나타났으며(Choi, 2008), 본 연구 해역인 신고리원자력발전소 배수구에서도 ESG II에 속하는 해조류가 71.1%, 대조구인 신암리와 대송리에서도 75%이상으로 나타났다. 특히 신암리의 경우 ESG II 뿐만 아니라 내열종의 출현 비율도 배수구와 대송리에 비해 높게 나타나 수온상승에 따른 스트레스가 환경오염이나 교란에 의한 스트레스와 구분되는지에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 선행 연구에서 해조류 생물량은 대조구에 비해 발전소 배수구에서 낮은 것으로 알려져 있다(Kim and

Ahn, 2006; Choi, 2008; Yoo et al., 2009). 한 예로, 동해안의 3개 원자력 발전소 배수구에서 해조류 생물량은 대조구에 비해 낮았으며, 월성원자력발전소 배수구에서는 127.3 g dry wt./m<sup>2</sup>으로 대조구(305.1 g dry wt./m<sup>2</sup>)에 비해 58.3% 낮게 나타났다(Kim and Ahn, 2005). 이외에도 고리원자력발전소 배수구의 생물량이 대조구(457 g dry wt./m<sup>2</sup>)의 33%에 불과한 153 g dry wt./m<sup>2</sup>였으며(Kim et al., 2007), 서해안 영광원자력발전소의 배수구 생물량(62.5 g dry wt./m<sup>2</sup>)은 대조구(5개 정점)의 평균 생물량(156.4 g dry wt./m<sup>2</sup>)보다 67.3% 낮게 나타남으로써, 온배수는 생물량 감소에 영향을 주는 것으로 확인되었다(Vadas et al., 1979; Kim and Huh, 1998). 본 연구에서도 배수구의 해조류 연평균 생물량은 168.0 g dry wt./m<sup>2</sup>로서 대조구(2개 정점)인 신암리와 대송리의 평균 생물량(216.7 g dry wt./m<sup>2</sup>)에 비해 22.5%가 낮게 나타났으나, 다른 원자력발전소 배수구의 해조류 생물량에 비해 높은 것으로 확인되었다.

해조류의 분류군별 출현종수를 기준으로 해조류의 지리적 분포 특성을 나타내는 C/P값은 한대에서 아열대 해역에 걸쳐 0.4-1.5범위의 값을 나타냈고(Segawa, 1956), R/P값은 한대와 극지역에서 ≤1.0 이하, 온대지역에서 1.0-4.0, 열대해역에서 ≥4.0 이상을 보였으며(Feldmann, 1937), (R+C)/P값에 따라, 온대성 내지 한대성(3), 혼합성(3-6), 열대성(6) 해조상으로 구분한다(Cheney, 1977). 본 연구에서 C/P 값과 R/P 값은 온대해역 해조상을 보였으며, (R+C)/P값은 혼합성 해조상을 보였다. Choi (2008)는 월성원자력발전소에서 해조류의 생태지수인 C/P, R/P, (R+C)/P값을 이용하여 취수구, 배수구 및 대조구를 구분하는 지표로 사용하기 어렵다고 하였는데, 본 연구에서도 배수구 및 대조구(신암리, 대송리)의 해조상이 모두 혼합성으로 구분되어 온배수의 영향 여부를 판단할 수 없었다. 하지만, 군집지수에서는 우점도지수를 제외한 종다양도지수, 풍도지수, 균등도지수에서 대조구에 비해 배수구가 낮은 값을 보임으로써 배수구 인근 해역에서 상대적으로 빈약한 해조류 군집구조를 가진 것으로 나타났다.

결론적으로, 신고리원자력발전소의 배수구에서는 대조구인 신암리와 대송리에 비해 해조류 출현종수와 생물량은 낮게 나타났고 내열성 해조류의 비율은 높게 나타남으로써 온배수 유입이 해조상과 군집구조에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한, 신고리원자력발전소는 과거 2011-2016년 동안 1-3호기가 가동되었고, 현재 4호기의 시험 가동과 함께 5-6호기가 새로 건설되고 있어, 발전소와 같은 산업시설물이 주변 해역의 기초생산자인 해조류 군집에 어떠한 영향을 미치는지를 장기간 모니터링하는 연구가 필요하다. 고착생물인 해조류 군집의 장기적인 모니터링을 통한 자료 축적은 온배수와 같은 독특한 환경조건에서 일어나는 해조류 종조성 및 군집의 변화에 대한 관리방안 마련을 위한 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

## References

- Abbott IA and North WJ. 1971. Temperature influences on floral composition in California coastal waters. Proc Intl Seaweed Symp 7, 72-79.
- Babitha D and Subramanian V. 2016. Natural growth and vertical distribution of marine red alga *Grateloupia filicina* (Rhodophyta/Gigartinales) and its associated fauna. Int J Curr Microbiol App Sci 5, 745-755. <http://dx.doi.org/10.20546/ijcmas.2016.512.085>.
- Carballo JL, Olabarria C and Osuna TG. 2002. Analysis of four macroalgal assemblages along the Pacific Mexican coast during and after the 1997-98 E1 Nino. Ecosystems 5, 749-760. <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-002-0144-2>.
- Cheney DP. 1977. A new and improved ratio for comparing seaweed floras. Suppl J Phycol 13, 129.
- Clarke KR and Gorley RN. 2006. PRIMER V6: User Manual/Tutorial. Plymouth Marine Laboratory, Devon, UK, 1-190.
- Choi HG. 2008. Effects of thermal effluents from Wolsong nuclear power plant on macroalgal composition and community structure. Algae 23, 151-162. <http://dx.doi.org/10.4490/ALGAE.2008.23.2.151>.
- Feldmann J. 1937. Recherches sur la vegetation marine de la Mediterranee. La cote des Alberes. Rev Algol 10, 1-339.
- Fowler J and Cohen C. 1990. Practical Statistics for Field Biology. John Wiley and Sons, New York, U.S.A., 1-227.
- Graham LE and Wilcox LW. 2000. Algae: Upper Saddle River. Prentice Hall, New Jersey, U.S.A., 1-640.
- Harley CDG, Anderson KM, Demes KW, Jorve JP, Kordas R, Coyle TA and Graham MH. 2012. Effects of climate change on global seaweed communities. J Phycol 48, 1064-1078. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1529-8817.2012.01224.x>.
- Janiak DS and Whitlatch RB. 2012. Epifaunal and algal assemblages associated with the native *Chondrus crispus* (Stackhouse) and the non-native *Grateloupia turuturu* (Yamada) in eastern Long Islands Sound. J Exp Mar Biol Ecol 413, 38-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jembe.2011.11.016>.
- Kim HK, Kang RS and Sohn CH. 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 HS, Boo SM, Lee IK and Sohn CH. 2013. National List of Species of Korea [Marine Algae]. National Institute of Biological Resources, Incheon, Korea, 1-336.
- Kim YH and Lee JH. 1980. A study on the marine algae at the coast of Kori nuclear power plant 1. Variation of algal community during 1977-1978. Korean J Bot 23, 3-10.
- Kim YH. 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 YH, Ahn JK, Lee JI and Eum HM. 2004. Effects of heated effluents on the intertidal macroalgal community near Uljin, the east coast of Korea. Algae 19, 257-270. <http://dx.doi.org/10.4490/ALGAE.2004.19.2.257>.

- org/10.4490/ALGAE.2004.19.3.257.
- Kim YH and Ahn JK. 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. <http://dx.doi.org/10.4490/ALGAE.2005.20.3.217>.
- Kim YH and Ahn JK. 2006. Effects of heated effluents on the intertidal macroalgal community near Wolseong, the east coast of Korea. *Algae* 21, 453-461. <http://dx.doi.org/10.4490/ALGAE.2006.21.4.453>.
- Kim YH, Ahn JK, Yoon HE and Jang MA. 2007. Effects of heated effluents on the intertidal macroalgal community near Gori nuclear power plant. *Algae* 22, 297-304. <http://dx.doi.org/10.4490/ALGAE.2007.22.4.297>.
- Kim YH and Choi SI. 1995. Effects of cooling system at power plant on marine algal vegetation. *Korean J Phycol* 10, 121-141.
- Kim YH and Huh SH. 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 YS, Choi HG and Nam KW. 2008. Seasonal variations of marine algal community in the vicinity of Uljin nuclear power plant, Korea. *J Environ Biol* 29, 493-499.
- Lambhead PJD, Platt HM and Shaw KM. 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. <http://dx.doi.org/10.1080/00222938300770671>.
- Lee IK, Lee HB and Boo SM. 1983. A summer marine algal flora of islands in Jindo-gun. *Rep Sur Natur Environ Korea* 3, 293-311.
- Liang Z, Wang F, Sun X, Wang W and Liu F. 2014. Reproductive biology of *Sargassum thunbergii* (Fucales, Phaeophyceae). *American J Plant Sci* 5, 2574-2581. <http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2014.517271>.
- Littler MM and Littler DS. 1984. Relationships between macroalgal functional form groups and substrate stability in a subtropical rocky intertidal system. *J Exp Mar Biol Ecol* 74, 13-34. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-0981\(84\)90035-2](http://dx.doi.org/10.1016/0022-0981(84)90035-2).
- Margalef R. 1958. Information theory in ecology. *General Systematics* 3, 36-71. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01855.x>.
- McNaughton SJ. 1967. Relationship among functional properties of California Grassland. *Nature* 216, 168-169. <http://dx.doi.org/10.1038/216168b0>.
- Orfanidis S, Panayotidis P and Stamatis N. 2003. An insight to the ecological evaluation index (EEI). *Ecol Indicators* 3, 27-33. [http://dx.doi.org/10.1016/S1470-160X\(03\)00008-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1470-160X(03)00008-6).
- Satheesh S and Wesley SG. 2012. Diversity and distribution of seaweeds in the Kudankulam coastal waters, south-eastern coast of India. *Biodivers J* 3, 79-84.
- Segawa S. 1956. Colored illustrations of the seaweeds of Japan. Hoikusha Press, Osaka, Japan, 1-175.
- Steinbeck JR, Schiel DR and Foster MS. 2005. Detecting long-term change in complex communities: A case study from the rocky intertidal zone. *Ecol Appl* 15, 1813-1832. <http://dx.doi.org/10.1890/04-1046>.
- Vadas RL. 1979. Abiotic disease in seaweeds: thermal effluents as causal agents. *Experimenta* 35, 435-437. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01922692>.
- Whitaker SG, Smith JR and Murray SN. 2010. Reestablishment of the southern California rocky intertidal brown alga, *Silvetia comperessa*: An experimental investigation of techniques and abiotic and biotic factors that affect restoration success. *Restor Ecol* 18, 18-26. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00717.x>.
- Yoo HI, Park HH and Choi HG. 2009. Marine algal floras and community structures in the vicinity of the Taeon power plant in Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 42, 387-394. <http://dx.doi.org/10.5657/kfas.2009.42.4.387>.