Algae
Volume 19(3): 257-270, 2004

동해안 울진원전의 온배수 방출이 주변 해조군집에 미치는 영향

김영환* · 안중관 · 이재일 · 엄희문[1]

(충북대학교 생명과학부, [1]전력연구원 환경평가그룹)

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

Young Hwan Kim*, Jung Kwan Ahn, Jae Il Lee and Hee Moon Eum[1]

School of Life Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 361-763 and
[1]Environment Research Group, Korea Electric Power Research Institute, Daejeon 305-380, Korea

In order 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 Uljin nuclear power plant on the East Coast of Korea were investigated seasonally from February 1992 to October 2000. 107 species of marine algae were found at the discharge canal during the past nine years. In general, the number of species observed was abundant in spring or summer and less in autumn or winter. 27 species (4 blue-green, 5 green, 6 brown and 12 red algae) of marine algae occurred more than 1/6 frequency and thus can be categorized as warm tolerant species. Among these, one brown (*Dictyota dichotoma*) and four red algae (*Gelidium amansii, Amphiroa ephedraea, Hydrolithon sargassi, Marginisporum crassissimum*) are recorded as warm tolerant marine algae for the first time in Korea. *Padina arborescens, Amphiroa zonata* and *Corallina pilulifera* were common species found more than 75% frequency. Seasonal fluctuations of mean biomass were 0-1,330 g dry wt m^{-2} and dominant species in biomass were *Corallina pilulifera* (contribution to a total biomass proportion 34%), *Amphiroa zonata* (23%), *Padina arborescens* (18%) and *Sargassum micracanthum* (11%). The red algae appeared as predominant algal group at the discharge canal of Uljin nuclear power plant in the qualitative and quantitative aspects. The green algae such as *Enteromorpha compressa* appeared rather frequently at the discharge canal, but the biomass proportion was very low, in contrast to Kori nuclear power plant where there was definite green algal dominance. Differences in algal communities developed at the discharge canals of Uljin and Kori nuclear power plant on the East Coast of Korea, particularly biomass proportions of green algae, can probably be related to local environmental factors such as water velocity through the canal and natural seawater temperatures.

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

서 론

1978년 4월에 고리원자력 1호기가 최초로 상업운전을 개시한 이래 우리나라 원전사업은 눈부신 성장을 거듭하여, 현재 고리, 영광, 월성, 울진 4곳의 원전단지에서 총 18기의 원자력발전소가 운전 중에 있으며, 원전 설비용량은 총 1,572만 kW로 국내 총 발전설비용량(5,380만 kW)의 약 29.2%를 점유하게 되었고 원전 설비용량 기준으로 세계 6위의 원전 보유국가가 되었다(김 2003).

원자력은 저렴한 핵연료를 이용하여 대량 발전을 할 수 있는 기술집약형 에너지원이며, 석유와 석탄 등 발전연료의 수입대체 효과가 크기 때문에 각광을 받고 있다. 특히 최근 들어 화석 연료 사용에 따른 지구온난화가 국제적으로 심각한 문제로 대두되고 있고, 석탄이나 석유를 이용하는 화력발전이 국내 이산화탄소 배출량의 20% 가량을 차지하고 있음을 고려해 볼 때, 향후 국내 발전전력량에 있어서 원자력발전의 비중이 더욱 제고될 전망이다.

그런데 원자력발전소에서는 화력발전소와 마찬가지로 발전에 사용된 증기를 물로 응축시켜 재사용하기 위하여 다량

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

의 냉각수를 필요로 하고, 이 과정에서 온도가 상승된 물이 주변으로 방출된다. 이렇게 자연수온보다 높은 온도를 지니면서 주변의 바다로 배출되는 냉각수인 온배수(thermal effluents)는 냉각탑을 거치지 않는 관류냉각방식(once-through cooling system)을 채택하는 발전소에서는 필연적인 것이다(IAEA 1974). 따라서 이 냉각방식을 채택한 우리나라에 건설된 모든 원자력발전소는 다량의 온배수를 주변 수역으로 방출할 수밖에 없다.

그 결과 원자로의 열 제거 시설인 복수기(condenser)의 입 · 출구 온도차(△T 또는 δT)가 평균 8-12°C에 이르게 되며(Glasstone and Jordan 1980), 상황에 따라서는 △T가 15°C에 달하는 경우도 발생하고 있음을 본다. 그리하여 아열대 또는 열대 지방의 원자력발전소에서는 복수기를 통과한 온배수가 45-50°C에 이르고, 주변의 수역에서도 35-40°C의 높은 온도가 측정되는 경우도 있다(Langford 1990).

온배수가 확산되는 해역에서는 자연 해수보다 높은 수온 때문에 각종 해양생물은 분포와 생장에 영향을 받을 수 있다(김 2000). 그러나 다른 한편으로 발전소의 복수기를 통과한 냉각수가 흐르는 배수로(discharge canal)에는 자연 수온보다 높은 온도 조건에도 불구하고 해조류를 포함하여 다양한 해양생물이 출현하고 있음을 본다(김 2003).

생물종은 그 종이 요구하는 서식처의 다양한 환경요인이 적합한 곳에 출현하게 된다. 특히 해조류의 경우, 가장 중요한 환경요인으로 간주되는 온도는 매우 중요한 환경요인의 하나가 되고 있다. 이러한 맥락에서 Abbott와 North(1971)는 미국 California 주 연안의 해조류 가운데 20°C 이상 되는 해역에 생육하는 종류를 내열종(warm tolerant species)으로 보고한 바 있다. 이들은 주어진 환경요인의 온도 범위와의 상관 관계를 고려하여 20°C를 내열종의 기준으로 간주하였다.

온대 지방에 위치한 우리나라의 경우 원자력발전소가 위치한 동해안 남부의 수온은 9-22°C의 변동 범위를 보이고 있다(국립수산과학원 2003). 그런데 발전소가 정상적으로 가동하게 되면 대체로 20°C 이상의 온배수가 주변 해역으로 방출되며, 특히 자연 수온이 높은 여름에는 30°C 이상의 온배수가 방출되고 있다(한국전력공사 1993-2001). 따라서 이 지역에서 연안수와 혼합되기 전의 배수로에 출현하는 해조류는 20-30°C의 높은 수온에서도 잘 견딜 수 있는 내열종으로 간주될 수 있다.

한국산 내열종 해조류의 규모와 특성은 우리나라에서 처음으로 건설된 고리원자력발전소 주변을 대상으로 비교적 다양한 자료가 축적되었다. 먼저 김(1986)은 1983년의 4계절 동안 고리원자력발전소 1호기 배수로에서 11종(녹조식물 2종, 갈조식물 2종, 홍조식물 7종)의 해조류가 출현하고, 이 가운데 납작파래(*Enteromorpha compressa*), 작은구슬산호말(*Corallina pilulifera*)과 붉은까막살(*Prionitis cornea*) 등이 배수로에서 연중 풍부하게 출현하고 있음을 보고하였다.

이후 김 등(1992)은 동일한 발전소를 대상으로 1987년 4월-1989년 2월에 걸쳐 매월 해조류 분포를 조사하면서 녹조류 2종(납작파래, 구멍갈파래 *Ulva pertusa*), 갈조류 3종(부챗말 *Padina arborescens*, 괭생이모자반 *Sargassum horneri*, 큰잎모자반 *S. ringgoldianum*), 그리고 홍조류 5종(작은구슬산호말, 참지누아리 *Grateloupia filicina*, 붉은까막살, 부챗살 *Ahnfeltiopsis flabelliformis*, 진두발 *Chondrus ocellatus*)이 1호기 배수로 또는 배수로 주변 조하대에 우점하고 있음을 밝혔다.

그런데 1980년대에 단편적으로 수집된 이들 자료와는 달리 김 등(1998)은 고리원자력발전소 배수로에 분포하는 해조류를 대상으로 정성 · 정량적 분석을 시도하였다. 즉 이들은 1992년 2월부터 1997년 10월에 이르기까지 6년간 계절별로 고리원자력발전소를 대상으로 배수로에 출현하는 해조류의 종조성과 생물량을 조사하고, 그 결과 23종(남조식물 1종, 녹조식물 7종, 갈조식물 5종과 홍조식물 10종)의 내열종을 보고하였다. 생물량을 바탕으로 한 우점종의 변동을 조사하고 내열종을 정성 · 정량적으로 분석한 이 연구는 우리나라 발전소 배수로에 출현하는 내열종 해조류를 집중적으로 분석한 첫 번째 성과로 간주된다.

내열종 해조류의 질적 다양성과 양적 풍부성에 관한 자료의 확보는 해조류의 종별 생육 한계를 밝히는 데 귀중한 자료로 활용할 수 있을 뿐만 아니라, 원자력발전의 가동에 따른 온배수의 방출이 해조 식생에 미치는 영향을 평가하는 데 기여할 수 있다는 점에서 그 의의를 찾을 수 있다. 그럼에도 불구하고 이와 관련한 국내의 연구는 미흡하다고 평가되며, 따라서 우리나라의 고유한 내열종 해조류의 생태적 특성을 이해하기 위한 다각적인 연구의 필요성이 제기되고 있다.

본 연구는 이러한 배경 아래 아직까지 내열종 해조류의 규모가 학계에 보고되지 않은 울진원자력발전소를 대상으로 발전소에서 배출되는 온배수에 의한 내열종 해조류의 종조성과 생물량을 조사하고, 그 생태적인 특성을 구명하기 위하여 시도되었다. 특히 고착성 특징으로 인하여 부착 해조류가 원자력발전의 가동에 따른 온배수의 환경영향 평가에 귀중한 지표생물로 활용되고 있음을 고려해 볼 때, 이와 같은 연구는 해조류의 종별 생육 한계를 밝히는데 귀중한 자료로 활용될 수 있다는 점에서 그 의의를 찾을 수 있을 것이다(Vadas *et al.* 1976; 김과 최 1995; 김과 허 1998).

조사지 개황

발전소의 개황

경상북도 울진군에 위치한 울진원자력발전소(Fig. 1)는 1981년 1월에 착공하여 950 MWe 시설용량의 1호기와 2호기가 각각 1988년 9월과 1989년 9월에 상업운전을 시작하였고,

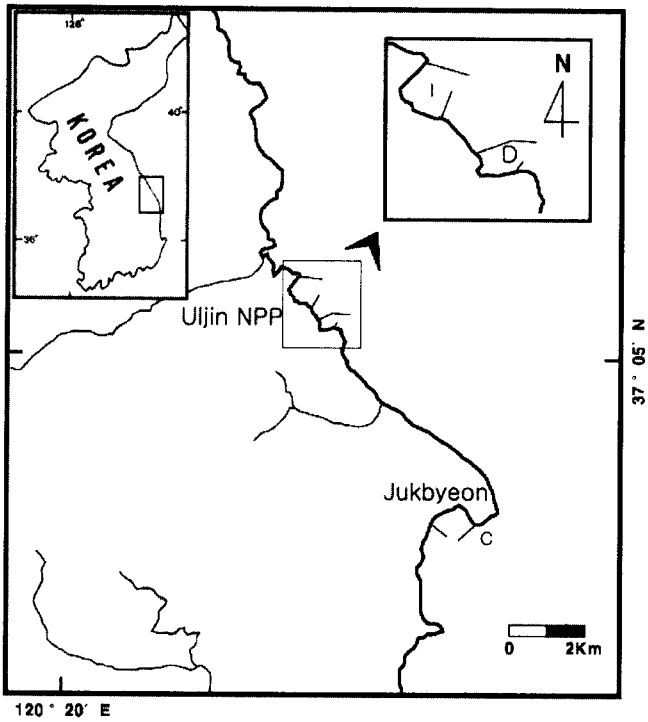

Fig. 1. A map showing the sampling sites of Uljin nuclear power plant. I, intake; D, discharge canal; C, control site.

이어서 1,000 MWe 시설용량의 3호기와 4호기가 1998년과 2000년에 가동을 개시하였다. 한편 동일한 부지에서 각각 1,000 MWe 시설용량의 5호기와 6호기가 1996년에 착공되어 2005년 6월 준공 예정으로 현재 공사가 진행 중에 있다.

울진원자력발전소는 가압경수로형 원자로이면서 관류냉각방식을 채택하고 있으며, 현재 가동중인 발전소 4개 호기의 냉각계통은 동일한 취수로와 배수로를 이용하고 있다. 발전소가 정상적으로 가동할 때 1호기와 2호기에서는 각각 61.8 $m^3 sec^{-1}$의 냉각수가 방출되며, 3호기와 4호기에서는 각각 49.8 $m^3 sec^{-1}$의 냉각수가 방출된다(김 2003).

한편 원자력발전소가 정상적으로 가동할 경우 복수기의 입 · 출구 온도차는 계절별로 6-11℃의 범위를 보이고 있으며(Fig. 2), 그 평균 온도차는 약 8℃이다(한국전력공사 1993-2001). 복수기 출구의 수온은 매년 여름을 전후하여 23℃ 이상 높게 나타나고 있는데, 특히 1994년과 1998년의 여름에는 33℃ 이상의 매우 높은 온도를 보였다. 복수기를 통과한 다음 냉각수의 온도는 차츰 감소하여 주변 해수와 혼합되기 전의 배수로를 흐르는 냉각수의 온도는 주변의 자연해수보다 2-4℃ 범위로 높게 측정된다.

주변 해역의 해황

이 연구가 수행된 울진원자력발전소 주변의 환경 요인 변화를 간략하게 살펴보면 다음과 같다.

먼저 기상요인의 경우 발전소와 근접한 기상청의 기상관

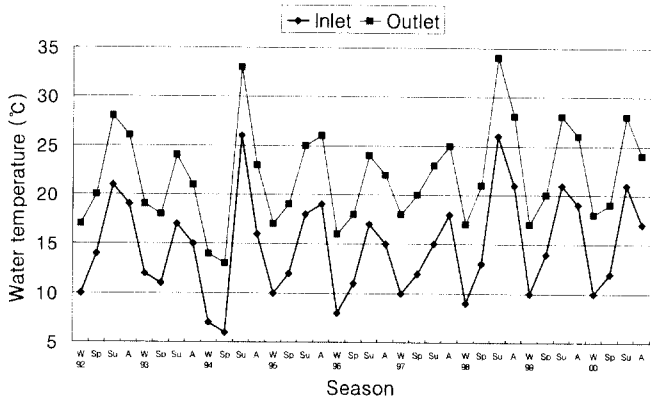

Fig. 2. Comparison of water temperatures measured at the inlet and outlet of the condenser of Uljin nuclear power plant during 1992-2000.

측지점인 울진과 또다른 관측지점인 남쪽의 포항이나 울산의 자료를 비교해 볼 때(기상청 2002), 최근 30년간의 기온 평년치는 울산과 포항에서 공히 13.8℃인 반면, 울진은 12.5℃로 울산이나 포항에 비하여 1℃가 낮았다. 강수량의 평년치는 포항에서 1,120 mm, 울진에서 1,102 mm이었는데, 울산에서는 1,275 mm로 많았다. 일조량의 평년치는 북쪽의 울진에서 2,494시간으로 많았지만, 울산과 포항에서는 각각 2,205시간과 2,165시간으로 울진의 경우보다 다소 짧았다. 그밖에 바람의 평년치는 남쪽의 울산(2.2 $m \cdot s^{-1}$)에서 포항(2.9 $m \cdot s^{-1}$)을 거쳐 북쪽의 울진(3.6 $m \cdot s^{-1}$)으로 올라 갈수록 빨라지는 경향을 보였다.

한편 국립수산과학원이 매년 조사하는 해양환경 조사결과 가운데, 울진원자력발전소와 근접한 연안 정지관측점인 죽변과 남쪽의 부산과 구룡포에서 관측한 자료의 2000년 연평균 자료를 비교하면 다음과 같다(국립수산과학원 2003).

먼저 수온의 경우, 부산 17.4℃, 구룡포 16.2℃, 그리고 죽변 15.9℃로 나타나서 부산과 죽변의 연평균 수온은 1.5℃의 차이를 보였다. 염분도는 부산과 구룡포에서 각각 32.65‰와 32.36‰로 비슷하였으나, 죽변에서 33.02‰로 다소 높았다. pH는 3개 관측점 모두에서 8.1 내외로 비슷하게 나타났고, 용존산소 역시 7.6-8.0 $mg \cdot l^{-1}$의 다소 비슷한 범위를 보였다. 그렇지만 화학적 산소요구량은 부산에서 1.84 $mg \cdot l^{-1}$, 구룡포에서 1.13 $mg \cdot l^{-1}$ 그리고 죽변에서 0.79 $mg \cdot l^{-1}$로 나타나서, 남쪽의 정점에서 북쪽으로 갈수록 현저하게 줄어드는 경향을 보였다.

재료와 방법

1992년 2월부터 2000년 10월에 이르기까지 9년간 계절별로 동해안 울진원자력발전소의 배수로(Fig. 1, D)에서 해조류의 종조성과 생물량을 조사하였다. 아울러 발전소 배수로에 출

현하는 해조류의 정성 · 정량적 특성을 파악할 목적으로 냉각수가 유입되는 취수로(Fig. 1, I)와 온배수의 영향을 받지 않을 것으로 판단되는 지점인 죽변을 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(이를테면 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.

내열종 해조류의 판정

계절별로 9년 동안 36회에 걸친 조사를 통하여 발전소의 배수로에서 출현한 해조류 모두를 고온성 환경에 잘 적응하는 해조류로 간주하기는 어렵다. 물론 총 조사횟수 가운데 출현빈도 20% 이상 출현한 종을 내열종으로 간주할 수도 있지만(김 등 1998), 이는 객관성이 다소 결여된다고 평가된다.

따라서 본 연구에서는 생태학적 조사에서 보편적으로 사용되는 방법 가운데 종수/면적 곡선(species/area curve)에 따라 최소면적(minimal area)을 산출하는 기법을 도입하였다(Mueller-Dombois and Ellenberg 1974; Colinvaux 1993).

즉 배수로에서 조사된 종조성 자료를 바탕으로 해조류 종별 출현횟수를 파악한 다음, x축에 조사횟수를 그리고 y축에 출현횟수의 누적 종수를 표시하여 종수/출현횟수 곡선(species/occurrence curve)을 그렸다. 여기서 얻어지는 종수/출현종수 곡선을 바탕으로 총 출현종수 직선(total species line)을 얻은 다음, 누적 출현종수 곡선과 평행하게 나타나는 접선(tangent)을 파악하고, 이 접선에서 수직으로 내린 조사횟수를 내열종을 판정하는 기준으로 삼았다.

해조류의 생물량 조사

생물량 측정을 위하여 배수로의 해조군집을 대표할 수 있는 암반 또는 방파제 테트라포드 상에 3-5개씩의 0.5 m × 0.5 m 방형구를 설치하고, 방형구 내의 모든 해조류를 호미 등으로 완전히 수거한 후 10% 포르말린-해수 용액으로 고정하여 실험실로 운반하였다. 한편 종조성 조사의 경우와 마찬가지로 취수로와 대조구에서도 동일한 방법으로 생물량 조사를 실시하였다.

이렇게 각 방형구별로 채집된 재료는 실험실에서 담수로 충분히 씻고 종류별로 구분하여 건조로(drying oven)에서 105°C로 24-48시간 건조시켰다. 완전히 건조된 시료를 건조기(desiccator)에서 식힌 다음, 그 무게를 0.01 g 수준까지 측정하여 단위면적(m^2)당 무게로 환산하고, 해조류 종류별 생물량 평균치와 단위면적당 현존량 구성비(%)를 구하였다(김 등 1995, 1997).

결과와 고찰

1992년 2월부터 2000년 10월에 이르기까지 9년간 계절별로 울진원자력발전소 배수로를 중심으로 얻어진 조사 결과를 살펴보면 다음과 같다.

배수로 해조류의 종조성

울진원자력발전소 배수로에서는 9년에 걸친 조사를 통하여 총 107종(남조식물 13종, 녹조식물 12종, 갈조식물 22종, 홍조식물 60종)의 해조류가 관찰되었다(Table 1). 조사시기별로는 0-28종의 범위로 해조류가 관찰되었으며, 대체로 봄과 여름에 다양하고 가을 또는 겨울에 출현종수가 적은 계절적 추세를 보였다(Fig. 3).

여기서 한 가지 특이한 점은 1994년 가을에 울진원자력발전소 배수로에서 해조식생을 전혀 관찰할 수 없었다는 점이다. 이는 그해 여름에 자연해수의 온도가 상승하고 특히 발전소 복수기를 통과한 냉각수의 온도가 33°C 이상 높게 나타나면서(Fig. 2), 높은 수온으로 말미암아 예전에 발전소 배수로에 출현하던 해조군집이 사라진 것으로 추정된다.

발전소의 취수로와 배수로 그리고 대조구의 해조류 출현을 비교한 결과, 배수로의 해조류 다양성은 취수로 또는 대조구보다 대체로 낮았으며(Fig. 3), 조사시기별 평균 출현종수는 배수로에서 15종으로 나타나서 대조구의 50종과 취수로의 30종에 비하여 현저하게 낮았다. 따라서 발전소의 복수기를 통과하여 수온이 상승된 냉각수가 흐르는 배수로에서는 냉각수가 유입되는 취수로 또는 대조구에 비하여 전반적으로 출현종수가 낮은 것으로 밝혀졌다.

동해안의 고리원자력발전소와 월성원자력발전소를 대상으로 동일한 기간에 걸쳐 동일한 방법으로 발전소의 취수로와 배수로 그리고 대조구의 해조류 출현을 비교한 결과에서도 배수로의 해조식생이 가장 빈약한 것으로 확인된 바 있다(엄 2003). 그런데 발전소의 취수로나 대조구와 비교한 배수로 해조류의 조사시기별 평균 출현종수는 발전소별로 차이

Table 1. A list of marine algal species found at the discharge canal of Uljin nuclear power plant during 1992-2000 (W, Winter; Sp, Spring; Su, Summer; A, Autumn)

Species	1992				1993				1994				1995				1996				1997				1998				1999				2000			
	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A
Cyanophyta																																				
Coccochloris stagnina			+																				+													
Lyngbya aestuarii	+													+																						
L. confervoides			+																																	
L. infixa																																		+		
L. lutea							+														+	+	+				+	+						+		
L. semiplena		+											+			+																				
Microcoleus chthonoplastes	+																				+		+	+	+	+	+	+					+		+	+
Oscillatoria brevis										+						+	+		+		+	+													+	
O. corallinae														+	+																					
O. margaritifera																													+							
O. nigro-viridis		+																	+	+			+	+	+				+				+			
Spirulina labyrinthiformis			+																								+									
Calothrix confervicola			+																																	
Chlorophyta																																				
Monostroma nitidum	+																																			
Enteromorpha compressa	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+			+		+			+	+		+	+	+	+	+	+	+		+			+			+
E. intestinalis									+					+								+					+	+								+
E. linza	+	+				+			+	+	+								+																	
E. prolifera					+		+		+	+	+		+				+				+		+	+	+	+	+						+	+		
Ulva pertusa	+	+	+		+	+			+	+	+			+											+			+					+	+	+	
Chaetomorpha moniligera		+									+																									
Cladophora albida				+			+																													
C. japonica							+																													
C. opaca																+																				
C. rudolphiana																																			+	
Codium fragile																													+						+	
Phaeophyta																																				
Acinetospora crinita			+																																	
Ectocarpus arctus			+		+				+	+					+		+								+		+				+					
Leathesia difformis		+	+																																	
Colpomenia bullosa		+												+																						
C. sinuosa		+	+		+	+	+	+	+	+				+	+		+	+	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+			+		+	
Petalonia binghamiae														+																						
Sphacelaria divaricata				+				+						+														+								

Table 1. (continued)

Species	1992				1993				1994				1995				1996				1997				1998				1999				2000			
	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A
S. lutea	+				+								+														+					+				
S. rigidula															+	+					+															
Dictyota dichotoma	+		+	+			+	+	+	+					+	+						+	+	+		+	+	+	+	+	+		+	+	+
Pachydictyon coriaceum								+																								+				
Padina arborescens	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	
Hizikia fusiformis										+																										
Sargassum confusum		+	+																										+					+		
S. giganteifolium																									+											
S. horneri	+	+	+					+										+	+			+					+	+			+	+	+		+	+
S. micracanthum				+	+	+	+	+	+	+	+									+		+			+	+		+	+	+		+	+	+	+	+
S. nigrifolium																		+								+				+				+		
S. patens																										+				+			+	+		+
S. ringgoldianum																						+														
S. serratifolium			+																																	
S. siliquastrum	+																																			
Rhodophyta																																				
Stylonema alsidii		+																				+														
Erythrocladia irregularis																	+										+									
Erythrotrichia carnea								+													+	+	+				+									
Bangia atropurpurea										+							+																			
Porphyra suborbiculata					+																															
P. tenera	+									+																										
Gelidium amansii										+	+			+			+									+				+				+	+	
G. divaricatum		+	+	+					+																+	+			+	+		+		+		+
G. pusillum		+																				+	+	+												
Pterocladia capillacea		+								+	+				+																					
Amphiroa dilatata	+		+																																	
A. ephedraea	+	+				+	+	+																		+	+			+	+					
A. zonata	+	+	+		+		+	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+
Bossiella cretacea								+																												
Corallina officinalis	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+									+		+	+	+	+		+			+				+		
C. pilulifera	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+				+					+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+
Hydrolithon sargassi																						+	+				+	+							+	+
Jania nipponica							+																													
Marginisporum aberrans																																				+
M. crassissimum					+		+			+												+				+	+									

Table 1. (continued)

Species	1992				1993				1994				1995				1996				1997				1998				1999				2000			
	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A
Pneophyllum zostericolum	+	+	+		+	+		+	+	+	+				+	+	+				+	+	+	+		+	+	+		+				+	+	
Dumontia simplex	+																																			
Grateloupia acuminata									+																											
G. divaricata								+																												
G. filicina						+					+																									
G. imbricata										+																										
G. livida																										+										
G. turuturu																											+									
Pachymeniopsis elliptica															+																				+	
Prionitis cornea					+			+	+	+	+												+				+									
P. ramosissima	+																																			
Caulacanthus usutulatus	+	+			+	+		+	+					+	+	+						+			+	+		+					+	+		
Chondracanthus tenellus														+																						
Chondrus ocellatus							+		+	+																										
Hypnea charoides				+																			+				+								+	+
H. saidana																						+				+				+					+	
H. variabilis																														+						
Ahnfeltiopsis flabelliformis		+	+			+	+	+	+	+	+			+	+	+				+			+		+	+	+	+		+			+	+		
Champia japonica								+																												
C. parvula			+																									+					+			
Lomentaria catenata				+																																
L. hakodatensis		+																												+						+
L. lubrica															+												+							+		
Antithamnion nipponicum								+																												
Centroceras clavulatum																							+				+									
Ceramium boydenii															+																					
C. japonicum											+																									
C. kondoi																											+			+						
C. paniculatum															+																				+	
C. tenerrimum									+						+																					
Acrosorium flabellatum																						+					+									
A. polyneurum		+																									+									
A. yendoi				+																							+									
Chondria crassicaulis		+																																		
C. dasyphylla																							+													
Laurencia venusta																+											+									
Polysiphonia japonica											+																+			+				+		
P. morrowii	+																																			
P. yendoi																									+											
Symphyocladia latiuscula							+	+																												

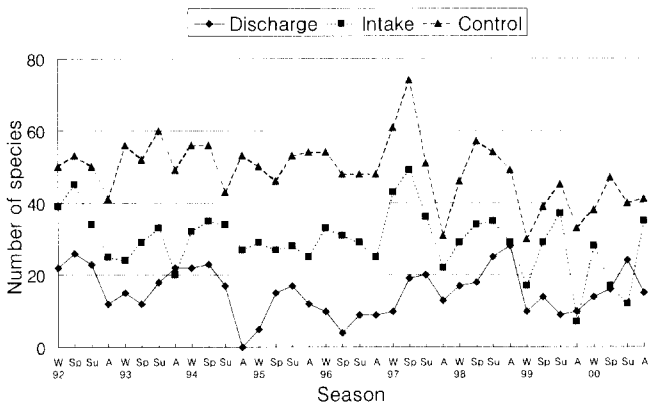

Fig. 3. Seasonal fluctuation of the number of algal species found at the discharge canal, the intake and the control site of Uljin nuclear power plant during 1992-2000.

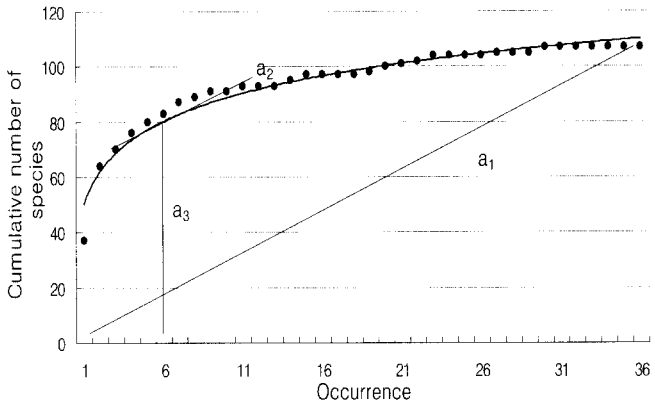

Fig. 4. Species/occurrence curve for the data in Table 1, plotting cumulative number of species against number of occurrence. Legend: a_1 = total species line; a_2 = tangent parallel to total species line; a_3 = protraction to occurrence to estimate warm tolerant species.

를 보이는 것으로 밝혀졌다.

먼저 고리원자력발전소의 경우, 배수로의 조사시기별 해조류 평균 출현종수(17종)는 취수로의 평균 출현종수(28종)에 비하여 61%에 해당하였으며, 대조구(36종)와 비교하면 절반에도 못 미치는 47%에 불과하였다. 한편 월성원자력발전소의 경우 배수로의 해조류 평균 출현종수(17종)는 취수로의 평균 출현종수(28종)에 비하여 61%에 해당하였으며, 특히 대조구(49종)와 비교하면 35%에 불과하였다(엄 2003).

그런데 이토록 배수로 해조식생이 빈약한 현상은 상기 두 개의 원자력발전소보다 위도가 높은 울진원자력발전소의 경우 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다. 즉 온배수가 흐르는 배수로의 해조류 평균 출현종수(15종)는 취수로(30종)의 절반에 불과하고, 대조구의 해조류 평균 출현종수인 50종과 비교하면 단지 30%에 불과한 것으로 밝혀졌다.

내열종 해조류

울진원자력발전소 배수로에서 36회에 걸쳐 조사된 종조성 자료(Table 1)를 바탕으로 얻은 종수/출현횟수 곡선은 Fig. 4와 같다. Fig. 4에 보인 바와 같이, 총 출현종수 직선(a_1)과 누적 출현종수 곡선과 평행하게 나타나는 접선(a_2)을 파악하고, 이 접선에서 수직으로 내린 조사횟수(a_3)는 6회로 나타났다. 따라서 울진원자력발전소 배수로에서 9년간 조사된 해조류 가운데 6회 이상 출현한 종을 내열종으로 판정하였다.

발전소 배수로에서 36회에 걸친 조사 가운데 6회 이상 출현한 종은 총 27종(남조식물 4종, 녹조식물 5종, 갈조식물 6종, 홍조식물 12종)이었다(Table 2). 이들 내열종 해조류 가운데 홍조 산호말과(Corallinaceae)가 7종으로 가장 다양한 구성을 보였으며, 녹조 갈파래과(Ulvaceae)가 5종으로 나타났다.

Table 2에 보인 바와 같은 울진원자력발전소 배수로의 내열종 해조류 27종 가운데 80%가 넘는 22종은 고리원자력발

Table 2. A list of warm-tolerant marine algae found at the discharge canal of Uljin nuclear power plant during 1992-2000

Cyanophyta
Lyngbya lutea
Microcoleus chthonoplastes
Oscillatoria brevis
O. nigro-viridis
Chlorophyta
Enteromorpha compressa
E. intestinalis
E. linza
E. prolifera
Ulva pertusa
Phaeophyta
Ectocarpus arctus
Colpomenia sinuosa
Dictyota dichotoma
Padina arborescens
Sargassum horneri
S. micracanthum
Rhodophyta
Gelidium amansii
G. divaricatum
Amphiroa ephedraea
A. zonata
Corallina officinalis
C. pilulifera
Hydrolithon sargassi
Marginisporum crassissimum
Pneophyllum zostericolum
Prionitis cornea
Caulacanthus usutulatus
Ahnfeltiopsis flabelliformis

Table 3. Common species (frequency ≥ 50%) at the discharge canal of Uljin nuclear power plant and their frequencies of occurrence in each division

Division	Species	Occurrence	Frequency (%)
Chlorophyta	*Enteromorpha compressa*	24	67
Phaeophyta	*Padina arborescens*	31	86
	Colpomenia sinuosa	24	67
	Dictyota dichotoma	21	58
	Sargassum micracanthum	20	56
Rhodophyta	*Amphiroa zonata*	31	86
	Corallina pilulifera	28	78
	Pneophyllum zostericolum	22	61
	Ahnfeltiopsis flabelliformis	20	56
	Corallina officinalis	19	53

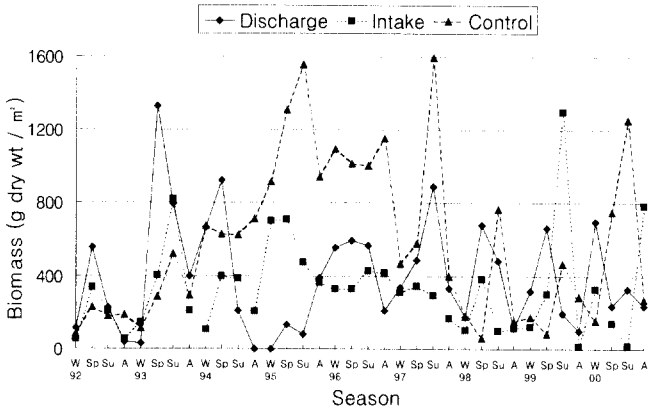

Fig. 5. Seasonal fluctuation of the mean biomass value of marine algae found at the discharge canal, the intake and the control site of Uljin nuclear power plant during 1992-2000.

전소 또는 월성원자력발전소 배수로에서 나타난 내열종들이다(김 등 1998; 엄 2003). 그러나 갈조류 1종(참그물바탕말 *Dictyota dichotoma*)과 홍조류 4종(우뭇가사리 *Gelidium amansii*, 에페드라게발 *Amphiroa ephedraea*, 모자반껍데기 *Hydrolithon sargassi*, 둘레게발혹 *Marginisporum crassissimum*)은 고리원자력발전소 또는 월성원자력발전소에서 밝혀진 내열종 목록에 포함되어 있지 않다.

따라서 울진원자력발전소 배수로에서 나타난 해조류 가운데 갈조류 1종(참그물바탕말)과 홍조류 4종(우뭇가사리, 에페드라게발, 모자반껍데기, 둘레게발혹)의 5종을 한국산 내열종 해조류 목록에 포함시킬 수 있을 것으로 판단된다.

1992-2000년에 걸쳐 울진원자력발전소 배수로에서 밝혀진 내열종 해조류 27종(Table 2) 가운데 50% 이상의 출현 빈도를 보인 종은 10종(녹조식물 1종, 갈조식물 4종, 홍조식물 5종)이었다(Table 3).

이 가운데 특히 갈조 부챗말(*Padina arborescens*)과 홍조 고리마디게발(*Amphiroa zonata*: 58%)이 공히 86%의 출현 빈도를 보여서 울진원자력발전소 배수로를 대표하는 해조류로 나타났으며, 고리마디게발과 함께 마디산호말 무리(articulated coralline algae)에 속하는 작은구슬산호말(*Corallina pilulifera*) 역시 78%의 비교적 높은 출현 빈도를 보였다(Table 3).

고리 및 월성원자력발전소를 대상으로 동일한 기간에 걸쳐 동일한 방법으로 내열종 해조류를 조사한 결과(엄 2003)와 울진원자력발전소를 대상으로 조사한 이번 결과(Table 3)를 종합해 볼 때, 녹조 납작파래(*Enteromorpha compressa*), 갈조 부챗말 그리고 홍조류 고리마디게발과 부챗살(*Ahnfeltiopsis flabelliformis*)의 4종이 동해안의 3개 원자력발전소 배수로 모두에서 50% 이상의 출현 빈도를 보였다. 따라서 이들 4종은 우리나라 원자력발전소 배수로에서 관찰되는 대표적인 내열종 해조류로 간주된다.

한편 동해안의 3개 원자력발전소에서 조사된 내열종 해조류의 출현 빈도를 비교해 볼 때 창자파래(*Enteromorpha intestinalis*), 괭생이모자반(*Sargassum horneri*), 붉은까막살(*Prionitis cornea*) 등은 위도가 낮은 고리원자력발전소에서 상대적으로 높은 출현 빈도를 보인 반면(엄 2003), 불레기말(*Colpomenia sinuosa*), 참그물바탕말, 잔가시모자반(*Sargassum micracanthum*), 참산호말(*Corallina officinalis*) 등은 북쪽에 위치한 울진원자력발전소 배수로에서 높은 출현 빈도를 보이면서 대조를 이루었다.

배수로 해조류의 생물량

울진원자력발전소 배수로에서 9년에 걸쳐 조사된 해조류의 단위면적당 평균 생물량은 조사시기별로 0-1,330 g dry wt m^{-2}의 넓은 범위로 나타났다(Fig. 5).

여기서 한 가지 특이한 점은 1994년 가을과 1995년 겨울의 두 차례에 걸쳐 울진원자력발전소 배수로에서 생물량을 측정할만한 해조식생을 발견할 수 없었다는 점이다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 1994년 여름의 높은 수온으로 말미암아 예전에 발전소 배수로에 출현하던 해조군집이 사라진 때문으로 추정된다. 이와 같이 두 계절에 걸쳐 교란되었던 배수로의 해조군집은 1995년 봄에 135 g dry wt m^{-2}의 생물량을 기록하면서 다소 회복된 것으로 조사되었다.

계절별로는 출현종수의 계절적 추세와 비슷하게 대체로 봄과 여름에 풍부하고 가을 또는 겨울에 생물량이 다소 적은 경향을 보였다.

발전소의 취수로와 배수로 그리고 대조구에서 계절별로 조사된 해조류 생물량을 비교한 결과, 배수로의 생물량이 대체로 대조구보다는 적었지만 취수로의 경우보다는 다소 많은 것으로 나타났다(Fig. 5). 즉 조사시기별 단위면적당 평균

Table 4. Major species (sum of seasonal biomass proportion ≥ 50%) and their contribution to a total biomass proportion at the discharge canal of Uljin nuclear power plant during 1992-2000

Division	Species	Contribution (%)
Phaeophyta	*Padina arborescens*	18
	Sargassum micracanthum	11
	Dictyota dichotoma	5
	Colpomenia sinuosa	2
	Sargassum patens	2
Rhodophyta	*Corallina pilulifera*	34
	Amphiroa zonata	23
	Gelidium divaricatum	2

생물량은 배수로에서 391 g dry wt m^{-2}로 나타나서 대조구의 평균 생물량 588 g dry wt m^{-2}에 비하면 적었지만, 취수로의 평균 생물량 301 g dry wt m^{-2}보다는 많았다. 취수로와 대조구의 해조류 생물량 역시 배수로의 경우와 비슷하게 봄과 여름에 많고 가을 또는 겨울에 적은 계절적 추세를 보였다.

36회에 걸친 조사 가운데 생물량을 전혀 측정할 수 없었던 1994년 가을과 1995년 겨울의 두 차례를 제외한 34회의 조사에서 계절별 생물량 구성비의 누적합계가 50%를 넘는 해조류는 모두 8종(갈조식물 5종, 홍조식물 3종)이었다(Table 4).

이들 8종의 해조류 가운데 6종(부챗말, 잔가시모자반, 참그물바탕말, 불레기말, 작은구슬산호말, 고리마디게발)은 Table 3에 보인 바와 같이 출현종의 종조성 조사에서도 50% 이상의 출현 빈도를 보인 종들이었다. 그러나 갈조 쌍발이모자반(*Sargassum patens*)과 홍조 애기우뭇가사리(*Gelidium divaricatum*)의 두 종은 각각 5회와 11회 출현한 종들이다(Table 1).

1992-2000년에 걸쳐 고리와 월성원자력발전소를 대상으로 내열종 해조류를 조사한 엄(2003)의 결과와 종합해 볼 때 납작파래, 구멍갈파래 등 녹조류 9종이 내열종 목록에 포함되었으며, 특히 갈파래과(Ulvaceae) 5종의 평균 출현 빈도는 42-80%에 이르고 있다. 더욱이 이들 갈파래과 수 종은 고리 및 월성원자력발전소에서 최근 9년간 측정된 생물량 조사에서도 2-18%의 비교적 높은 구성비를 보이는 우점종으로 나타나고 있다(엄 2003). 따라서 20-30°C의 높은 수온과 100-150 cm sec^{-1}의 빠른 유속 등 원자력발전소 배수로의 환경 압박은 다른 조류들보다도 파래 무리와 같은 다계절성 녹조류의 번무를 촉진하는 것으로 판단된다(김 등 1992, 1998).

그런데 울진원자력발전소를 대상으로 조사한 이번 결과에서 녹조 납작파래는 비록 종조성 조사에서 67%의 출현 빈도를 보이기는 하였지만(Table 3), 고리와 월성원자력발전소의 경우와 달리 발전소 배수로에서 차지하는 생물량 구성비는 낮은 것으로 밝혀졌다. 이는 울진원자력발전소의 경우 배수로의 유속이 30-50 cm sec^{-1}로 상대적으로 느리고 특히 자연수온이 고리원자력발전소나 월성원자력발전소의 경우보다 낮아서 파래 무리의 생육이 저해를 받는 것으로 추정된다.

Table 4에 정리된 바와 같은 해조류 내열종 가운데 홍조 작은구슬산호말의 평균 구성비가 34%로 가장 높았고, 그밖에 고리마디게발(평균 구성비 23%), 부챗말(18%), 잔가시모자반(11%), 참그물바탕말(5%), 불레기말(2%), 쌍발이모자반(2%), 애기우뭇가사리(2%) 등이 생물량으로 본 배수로 해조류의 주요종으로 나타났다.

특히 울진원자력발전소의 배수로에서는 산호말 무리인 작은구슬산호말과 고리마디게발이 차지하는 생물량 구성비가 매우 높은 것으로 나타났는데, 이들 두 종의 생물량 구성비의 합계는 최근 9년간 배수로에서 조사된 해조류 총 생물량의 절반 이상을 차지하면서 울진원자력발전소 배수로의 해조군집을 대표하는 것으로 확인되었다.

일반적으로 복수기를 통과하여 수온이 상승된 냉각수가 흐르는 발전소 배수로에서는 대체로 냉각수가 유입되는 취수로 또는 온배수의 영향을 받지 않을 것으로 간주되는 대조구와 비교하여 생물량이 낮은 추세를 보인다(김 등 1998; 김 1999; 엄 2003). 특히 월성원자력발전소의 경우에는 배수로 해조류의 조사시기별 평균 생물량이 취수로나 대조구의 절반에도 못 미치는 적은 양을 보이고 있음을 알 수 있다(엄 2003). 그렇지만 울진원자력발전소의 경우에는 예외적으로 배수로에서 취수로보다 평균 생물량이 많았는데(Fig. 5), 이는 냉각수가 흐르는 배수로에 작은구슬산호말이나 고리마디게발 등 산호말 무리가 번무하고 있기 때문으로 간주된다.

Table 4에 보인 내열종 8종이 차지하는 생물량 구성비의 계절별 변화 추세는 Table 5와 같다.

생활형에 있어서 모두 다년생 조류로 간주되는 홍조류 작은구슬산호말과 고리마디게발은 함께 출현하지 않는 특징을 보였다. 즉 1992년부터 1994년 봄까지는 발전소 배수로에서 주로 작은구슬산호말이 우점하였지만, 1994년 여름의 교란 이후 1995년 봄부터 작은구슬산호말의 출현이 현저하게 감소한 반면 고리마디게발이 새로운 우점종으로 출현하였다. 그러다가 1997년 가을부터 그 양상이 역전되어 1998-2000년에는 고리마디게발보다 작은구슬산호말의 생물량이 더 많은 경향을 보였다. 그러므로 자연적인 연안에서 시간이 경과함에 따라 해조류의 종조성과 생물량이 변화하는 것과 마찬가지로(Benedetti-Cecchi and Cinelli 1993; Menge *et al.* 1993), 온배수가 흐르는 배수로에서도 해조류의 천이 현상이 진행되는 것으로 판단된다(김 등 1998).

배수로 해조류의 정성 · 정량적 특성 비교

울진원자력발전소 배수로에서는 9년에 걸친 조사를 통하여 총 107종(남조식물 13종, 녹조식물 12종, 갈조식물 22종,

Table 5. Seasonal changes in biomass proportion of major species found at the discharge canal of Uljin nuclear power plant during 1992-2000

Species	1992				1993				1994				1995				1996			
	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A
Corallina pilulifera	16	54	20	59	89	96	83	5	57	62	–	–	–	–	3	–	–	–	–	–
Amphiroa zonata	27	3	31	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	61	6	90	72	70	86	93
Padina arborescens	47	39	40	37	–	–	4	21	1	16	75	–	–	29	81	9	28	5	10	2
Sargassum micracanthum	–	–	–	–	10	–	13	71	42	20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	4
Dictyota dichotoma	1	–	8	4	–	–	–	1	–	1	–	–	–	–	–	1	–	–	–	–
Colpomenia sinuosa	–	–	–	–	–	4	–	–	–	–	–	–	–	2	–	–	–	24	1	–
Sargassum patens	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Gelidium divaricatum	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Species	1997				1998				1999				2000			
	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A	W	Sp	Su	A
Corallina pilulifera	–	35	7	96	48	72	89	–	–	65	79	–	96	–	30	1
Amphiroa zonata	92	37	75	–	14	–	–	–	6	–	–	–	–	11	2	–
Padina arborescens	–	3	6	–	7	–	2	–	15	4	3	–	–	66	59	–
Sargassum micracanthum	–	–	–	–	–	4	–	82	40	11	–	43	3	18	–	21
Dictyota dichotoma	–	–	5	–	22	–	5	–	–	12	12	2	–	–	8	24
Colpomenia sinuosa	8	19	–	–	–	10	–	–	–	8	–	–	–	–	–	–
Sargassum patens	–	–	–	–	–	14	–	–	–	–	–	–	–	–	–	47
Gelidium divaricatum	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	55	–	–	–	–

Table 6. Floristic composition and mean of biomass proportion of marine algae at the discharge canal of Uljin nuclear power plant during 1992-2000

Division	Floristic composition	Biomass proportion
Cyanophyta	12%	—
Chlorophyta	11%	1%
Phaeophyta	21%	37%
Rhodophyta	56%	62%
Total	100%	100%

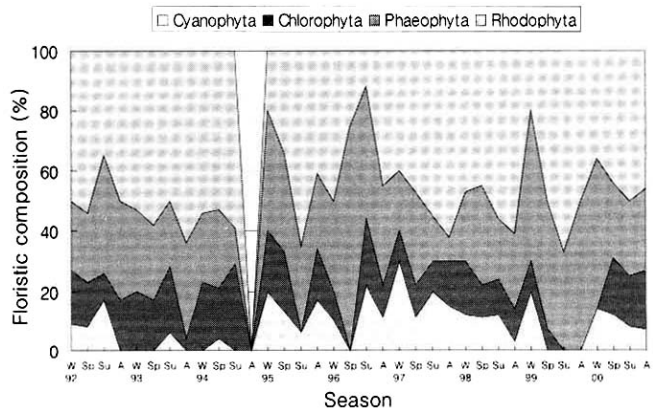

Fig. 6. Seasonal variation of specific composition among algal divisions at the discharge canal of Uljin nuclear power plant during 1992-2000.

홍조식물 60종)의 해조류가 관찰되었다(Table 1). 이를 해조류 문별로 비교해 볼 때 홍조류가 절반을 훨씬 넘는 56%의 구성을 보이면서 가장 다양하게 나타났고, 갈조류 21%, 남조류 12% 그리고 녹조류 11%의 순으로 출현하였다(Table 6). 울진원자력발전소의 배수로에서 녹조류의 출현이 적게 나타나면서 남조류보다 출현종수가 오히려 적었음은 특기할 만 하다.

계절별로 출현한 해조류의 문별 조성비는 홍조류가 0-67%의 범위(평균 46%)를 보였고, 갈조류가 0-75%(평균 30%), 녹조류가 0-29%(평균 13%), 그리고 남조류가 0-30%(평균 9%)의 범위로 나타났다(Fig. 6). 따라서 지난 9년간 울진원자력발전소 배수로에 분포하는 해조류의 출현종수와 계절별 조성비에 있어서 홍조류가 가장 중요한 조류 집단이었고, 갈조류가 그 다음을 이었으며, 녹조류와 남조류는 종조성에서 차지하는 비중이 대체로 비슷하게 나타났다.

한편 계절별로 조사된 해조류 문별 구성비의 연간 평균은 연도별로 다소 변동을 보이고 있음을 알 수 있다(Fig. 7).

먼저 남조류의 구성비는 1992년부터 1994년까지 감소하다가 이후 증가하여 1997년에는 연간 평균 19%를 기록하였지만, 이후 다시 감소하였다. 녹조류는 1992-1998년에 걸쳐 11-

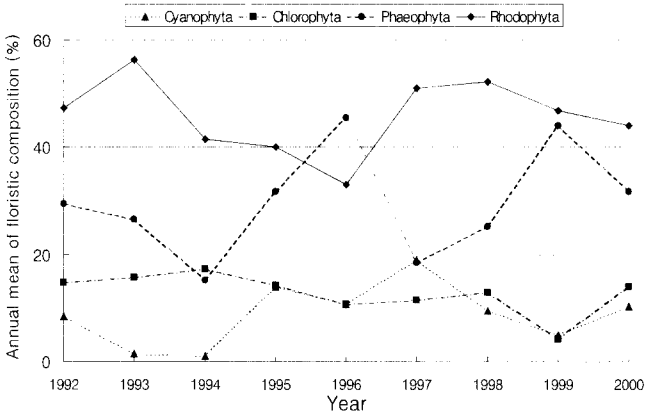

Fig. 7. Variation of annual mean of specific composition among algal divisions at the discharge canal of Uljin nuclear power plant during 1992-2000.

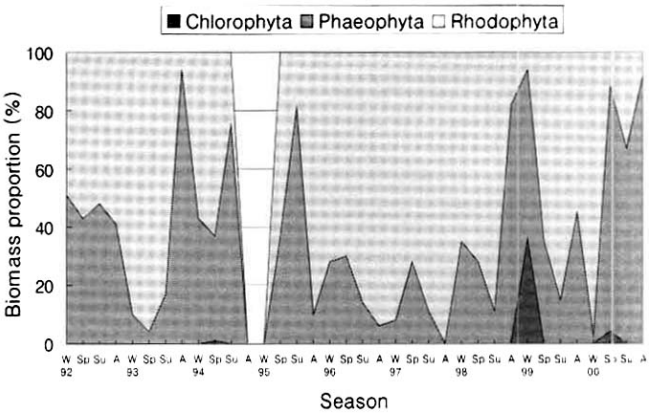

Fig. 8. Seasonal variation of biomass proportion among algal divisions at the discharge canal of Uljin nuclear power plant during 1992-2000.

17%의 수준을 유지하다가 1999년에 연간 평균이 4%로 줄었으나, 2000년에는 다시 예년의 수준으로 회복되었다.

한편 갈조류와 홍조류는 대체로 구성비 연간 평균의 변동이 서로 상반되는 양식을 보였는데, 1996년의 경우 홍조류 구성비의 연간 평균이 33%로 감소할 때 갈조류는 46%로 높았다가, 이듬해 홍조류의 연간 평균이 51%로 증가하면서 갈조류는 오히려 19%까지 감소하였다. 울진원자력발전소 배수로에서 갈조류와 홍조류의 구성비 연간 평균의 변동이 상반되는 추세는 동일한 기간에 걸쳐 동일한 방법으로 조사된 고리원자력발전소의 경우에서도 확인된 바 있다(엄 2003).

한편 1992년부터 2000년에 이르기까지 울진원자력발전소 배수로에서 조사한 해조류 생물량의 문별 구성비 평균은 홍조류가 62%로 가장 높았고, 갈조류가 37%, 그리고 녹조류가 1%로 나타났다(Table 6). 따라서 출현종수의 기여도와는 달리 홍조류와 갈조류의 생물량 구성비가 울진원자력발전소 배수로 해조식생의 거의 모두를 차지하였으며, 생물량 구성비에 있어서 녹조류가 차지하는 비중은 종조성의 경우와는 다르게 매우 적은 것으로 나타났다. 한편 남조류는 9년에 걸친 조사를 통하여 모두 13종이 관찰되기는 하였으나, 생물량은 거의 측정할 수 없었다.

울진원자력발전소 배수로에 생육하는 해조류의 특성을 비교해 볼 때, 우선 작은구슬산호말과 고리마디게발 등 산호말무리로 대표되는 홍조류가 다양성과 풍부성 측면 모두에서 중요한 생물 집단임을 알 수 있고, 부챗말로 대표되는 갈조류 역시 생물량의 기여도 측면에서 큰 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다. 반면에 녹조류는 고리나 월성원자력발전소 배수로에서는 중요한 조류 집단으로 나타났지만(엄 2003), 울진원자력발전소의 경우 특히 해조군집의 정량적 측면에서 차지하는 중요성이 매우 낮은 것으로 평가된다. 이는 앞서 논의한 바와 같이 울진원자력발전소의 경우 배수로의 느린 유속과 상대적으로 낮은 자연 수온이 파래 무리로 대표되는

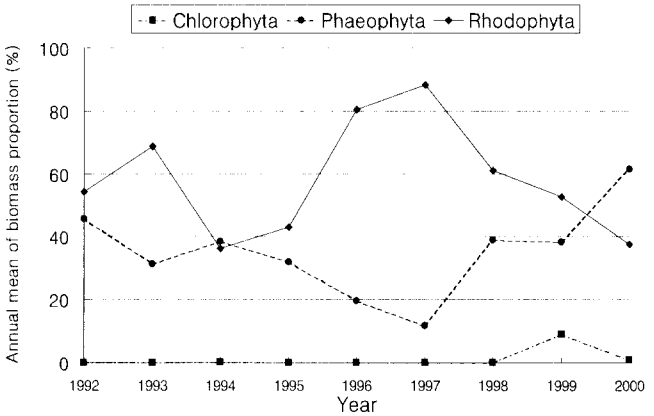

Fig. 9. Variation of annual mean of biomass proportion among algal divisions at the discharge canal of Uljin nuclear power plant during 1992-2000.

녹조류의 생육을 저해한 것으로 추정된다.

한편 1992-2000년에 걸쳐 울진원자력발전소의 배수로에서 출현한 해조류 생물량의 문별 구성비 변동을 계절별로 비교한 결과는 Fig. 8에 보인 바와 같다.

먼저 녹조류는 1999년 겨울에 청각(*Codium fragile*)이 출현하면서 생물량 구성비 36%를 기록한 경우를 제외하고는 지난 9년간 울진원자력발전소 배수로에서 거의 출현하지 않았다. 한편 울진원자력발전소 배수로 해조식생의 거의 대부분을 차지하는 갈조류와 홍조류는 생물량 구성비의 계절적 변동에 있어 매우 불규칙한 양상을 보였으며, 전반적으로 홍조류의 구성비가 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다.

그러나 해조류 문별 생물량의 구성비 변동 양식은 연도별로 비교해 볼 때 연차적인 변화 양상이 나타나고 있다(Fig. 9).

즉 울진원자력발전소 배수로에 출현하는 해조류 가운데 갈조류의 생물량 구성비는 1992년부터 계속 감소 추세를 보여 1997년에 연간 평균 12%로 낮았다가 1998년부터 다시 증

가하는 양상을 보였다. 이와는 달리 홍조류는 1994년부터 1997년까지 증가 추세를 보였지만, 1997년의 생물량 구성비의 연간 평균이 88%를 기록한 다음, 1998년부터 다시 감소하였다.

그간 국내외에서 수행된 다양한 연구를 통하여 온배수가 흐르는 발전소의 배수로에서는 해조식생의 종 다양성이 감소되고(Blake *et al.* 1976; Vadas *et al.* 1976; 김 1986; 김 등 1998), 녹조류나 남조류가 번무하기도 하며(Patrick 1974; Glasstone and Jordan 1980), 해조류 개체군 수준에서 생장률과 생장주기가 영향을 받는 등(김과 최 1995) 귀중한 정보가 다양하게 축적되어 왔음은 주지의 사실이다.

그런데 우리나라의 경우 동일한 부지에 4-6개호기의 원자로가 이미 가동되고 있을 뿐만 아니라 부지마다 2-4개호기의 대용량 발전소가 추가로 건설될 계획으로 있다(김 2003). 이들 발전소가 모두 가동되고 주변의 한정된 수역에 열에너지가 연속적으로 과다하게 축적되면 생태적 측면에서 예측하기 어려운 결과가 초래될 가능성을 배제할 수 없다(김 1999). 따라서 국내 원자력발전소 부지에서 방출되는 막대한 양의 온배수가 주변 해조군집의 정성 정량적 측면에 미치는 영향에 관한 면밀한 조사 계획을 수립하고 장기적으로 추적 감시할 필요가 있다고 판단된다.

사 사

이 논문은 2004년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음. 논문을 정리함에 있어 상세한 지적과 도움을 주신 서울대학교 이인규 명예교수님, 청주대학교 이해복 교수님, 충남대학교 부성민 교수님 그리고 강릉대학교의 김형근 교수님께 심심한 사의를 표한다. 아울러 이 논문을 심사하고 유익한 조언을 아끼지 않으신 심사위원과 편집위원님께 감사 드린다.

참고문헌

강제원. 1968. 한국동식물도감 제8권 식물편(해조류). 문교부. 465 pp.

국립수산과학원. 2003. 한국해양환경 조사연보(2002). 제7권. 국립수산과학원, 부산. 193 pp.

기상청. 2002. 기상연보 (2001년). 기상청, 서울. 282 pp.

김영환. 1986. 고리원자력발전소 주변 해조류에 관한 연구 2. 1983년의 해조류 식생. 조류학회지 **1:** 241-249.

김영환. 1999. 원자력발전소의 건설과 가동이 저서 해조류에 미치는 영향. 환경생물학회지 **17:** 379-387.

김영환. 2000. 발전소 온배수와 해양생태계. 전파과학사, 서울. 259 pp.

김영환. 2003. 원자력발전과 온배수: 그 현황과 대책. 전파과학사, 서울. 151 pp.

김영환, 남기완, 손철현. 1997. 동해안 주문진 조간대의 저서 해조류: 해조상, 분포 및 군집구조. 조류학회지 **12:** 117-130.

김영환, 엄희문, 강연식. 1998. 한국산 내열종 해조류의 정성 · 정량적 분석 1. 고리원자력발전소. 조류학회지 **13:** 213-226.

김영환, 유종수. 1992. 서해안 영광원자력발전소 주변의 해조식생. 환경생물학회지 **10:** 100-109.

김영환, 윤현주, 유종수. 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, 허성회. 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.

엄희문. 2003. 동해안 조간대의 내열성 해조류의 종조성과 생물량. 충북대학교 박사학위논문. 102 pp.

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. 1993. 원자력발전소 주변환경 조사보고서 - 일반환경('92). 한국전력공사 기술연구원, KRC-단93-006. 706 pp.

한국전력공사. 1994. 원자력발전소 주변환경 조사보고서 - 일반환경('93). 한국전력공사 기술연구원, KRC-단94-007. 765 pp.

한국전력공사. 1995. 원자력발전소 주변 환경조사 및 평가보고서 - 일반환경('94). 한국전력공사 기술연구원, KRC-단95-31. 981 pp.

한국전력공사. 1996. 원자력발전소 주변 환경조사 및 평가보고서 - 일반환경('95). 한국전력공사 전력연구원, '96 전력연-단41. 904 pp.

한국전력공사. 1997. 원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서(1996년보). 한국전력공사 전력연구원, '97 전력연-단233. 614 pp.

한국전력공사. 1998. 원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서(1997년보). 한국전력공사 전력연구원, '98 전력연-단398. 642 pp.

한국전력공사. 1999. 원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서('98년보). 한국전력공사 전력연구원, '99 전력연-단270. 707 pp.

한국전력공사. 2000a. 고리원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서('99년보). 한국전력공사 전력연구원, '00 전력연-단146. 257 pp.

한국전력공사. 2000b. 울진원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서('99년보). 한국전력공사 전력연구원, '00 전력연-단148. 222 pp.

한국전력공사. 2000c. 월성원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서('99년보). 한국전력공사 전력연구원, '00 전력연-단149. 240 pp.

한국전력공사. 2001a. 고리원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평

가보고서(2000년보). 한국전력공사 전력연구원, '01 전력연-단 072. 355 pp.

한국전력공사. 2001b. 울진원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서(2000년보). 한국전력공사 전력연구원, '01 전력연-단 072. 332 pp.

한국전력공사. 2001c. 월성원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서(2000년보). 한국전력공사 전력연구원, '01 전력연-단 072. 344 pp.

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

Benedetti-Cecchi L. and Cinelli F. 1993. Early patterns of algal succession in a midlittoral community of the Mediterranean sea: a multifactorial experiment. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **169:** 15-31.

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.

Colinvaux P. 1993. *Ecology* 2. John Wiley & Sons, Inc., New York. 688 pp.

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.

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.

Menge B.A., Farrell T.M., Olson A.M., Tamelen P. and Turner T. 1993. Algal recruitment and the maintenance of a plant mosaic in the low intertidal region on the Oregon coast. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **170:** 91-116.

Mueller-Dombois D. and Ellenberg H. 1974. *Aims and methods of vegetation ecology.* John Wiley & Sons, Inc., New York. 547 pp.

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 1. Species composition and distributional patterns. *Korean J. Phycol.* **9:** 193-203.

Patrick R. 1974. Effects of abnormal temperatures on algal communities. In: Gibbons J.W. and Sharitz R.R. (eds), *Thermal ecology.* Technical Information Center, U.S. Atomic Energy Commission. pp. 335-349.

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.

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 August 2004
Accepted 5 October 2004