

<총 설>

원자력발전소의 건설과 가동이 저서 해조류에 미치는 영향

김 영 환

(충북대학교 자연과학대학 생명과학부)

적 요 - 최근 우리나라에서는 산업이 급속도로 발전하면서 급증하는 전력수요를 충족하기 위하여 원자력발전소의 건설과 가동이 증가 추세에 있다. 수년에 걸친 발전소의 건설 과정에서 부지의 매립과 준설은 저서 해조류의 서식처를 교란시키고 이는 나아가서 종조성의 변화를 야기한다. 발전소가 정상 가동하게 되면 필연적으로 다량의 온배수를 주변으로 방출하는데, 고착성 해조류는 수온의 상승에 민감하게 반응한다. 국내 원자력발전소에서는 냉각수가 복수기를 통과하면서 수온이 7~12°C 상승하게 되며, 짧은 거리의 배수로를 거쳐 주변으로 방출된다. 배수로에 인접한 구역에서는 저서 해조류의 종조성과 다양성이 감소하는 것으로 조사되었다. 한편 발전소 냉각계통의 가동은 해조류 개체군 수준에서 성장률과 성장주기에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 연안수와 혼합되기 전의 배수로에 출현하는 해조류는 높은 수온에서도 견딜 수 있는 내열종으로 간주될 수 있으며, 동해안에 위치한 3개 원자력발전소의 배수로에서 1992~1998년에 걸쳐 출현한 해조류 중 출현빈도 20% 이상의 내열종 해조류는 총 35종(남조류 4종, 녹조류 9종, 갈조류 8종, 홍조류 14종)이었다. 해조류가 우리 민족에게 귀중한 자원이 되고 있음을 고려해 볼 때, 발전소로부터 방출되는 폐열이 해조식생에 미치는 영향을 저감시킬 수 있는 대책 수립이 요망된다.

서 론

최근 우리 사회의 생활 수준이 향상되고 특히 산업이 급속도로 발전하면서 필연적으로 엄청난 전기에너지가 요구되고 있다. 기존의 수력발전이나 화력발전으로는 이렇게 급증하는 전력수요를 충족하기 어렵고, 더욱이 뚜렷한 대체에너지원이 별로 없는 우리나라로서는 원자력발전소를 건설하고 가동함으로써 그 해결책을 모색하고 있는 실정이다.

1978년에 고리원자력발전소 1호기가 가동을 시작함으로써 본격적인 원자력시대에 돌입한 우리나라는 현재 동해안의 울진, 월성, 고리, 그리고 서해안 영광의 4개 원자력발전소에 모두 11기의 원자로가 가동되고 있다. 1998년을 기준으로 원자력발전의 설비용량은 국내 발전 설비용량의 약 28%를 차지하지만, 발전량은 우리나라 전체의 약 42%를 점하는 가장 중요한 발전원이 되고 있다. 물론 최근 들어 방사능 문제와 온배수 문제가 복잡한 쟁점으로 부각하면서 후속기 건설 및 신규 부지 확보에 어려움을 겪고 있기는 하지만, 경비와 장기적 연료 전략 차원에서 원자력발전소의 건설은 계속 추진될

전망이다.

이렇게 국내 발전의 중요한 몫을 차지하는 원자력발전은 열효율이 33% 정도로 낮아서 (Glasstone & Jordan 1980) 필연적으로 다량의 냉각수가 소요된다. 특히 냉각계통의 설계에 있어서 국내에 건설된 모든 원자력발전소는 관류냉각방식(once-through cooling system)을 취하고 있어서, 복수기를 통과한 냉각수를 주변 해역으로 직접 방류하고 있는 실정이다. 그 결과, 온배수가 흐르는 배수로 또는 주변 해수와 섞이는 해역은 수온의 시·공간적인 변동폭이 크고 해류 등의 물리적인 영향을 받아 복잡한 환경조건을 이루게 되면서 해양생태계의 변화를 야기한다 (Naylor 1965; Adams 1969; Langford 1990).

해양생태계의 생물적 구성요소 중 하나인 저서 해조류(benthic marine algae)는 저층에 고착하여 생육하는 특징 때문에 온배수의 영향을 평가할 수 있는 유용한 지표생물로 간주되고 있다 (North 1969; Abbott & North 1971; Blake *et al.* 1976; Vadas *et al.* 1976). 특히 우리나라는 세계에서 유례를 찾기 어려울 정도로 다양한 해조류를 식용, 약용 및 공업용으로 이용하고 있고 (Oh *et al.* 1990), 원자력발전소의 건설과 가동 이후 주변 해조류 양식장의 생산량이 변화하는 사례가 빈번히 발생하고

있는 실정이다. 따라서 원자력발전소라는 거대한 인공구조물의 출현과 발전소의 가동 이후 주변 해역으로 다량 배출되는 온배수에 의한 저서 해조류의 영향을 종합적으로 이해할 필요성이 제기되고 있다.

본 논문에서는 20세기 후반에 우리나라 원자력발전소를 대상으로 수행된 각종 관련 자료를 중심으로 원자력발전소의 건설과 가동이 주변에 분포하는 저서 해조류에 미치는 영향을 다각적으로 살펴보고, 이를 토대로 향후의 바람직한 대책을 논하고자 한다.

발전소의 건설이 해조류에 미치는 영향

원자력발전소의 건설은 대체로 수년의 기간이 소요되며, 부지를 매립하거나 준설하면서 엄청나게 많은 토사가 주변 해역으로 확산된다. 이렇게 토사와 같은 탁도 증가성 물질이 장기간에 걸쳐 대규모로 서식처에 유입되면 첫째 태양광의 투과를 감소시켜 광합성을 저해하고 해조류 조체의 표면에 정착하여 광합성이나 호흡을 억제하며, 둘째 토사의 퇴적으로 말미암아 해저면이 교란되면서 부착 해조류의 생육과 번식이 영향을 받으며, 셋째 해수 중의 부유물질 증가로 인하여 유해 미생물이 증식하면서 양식 해조류와 같이 밀식 생육을 하는 유용 해조류의 생장이 억제될 수 있다. 한편 건설 단계에서 또는 새롭게 건설된 구조물 주변에서 물의 흐름이 바뀌는 결과로 말미암아 퇴적물이 교란 받을 수 있다.

우리나라 최초의 원자력발전소인 고리원자력발전소 1호기는 1971년 11월에 착공되었으며, 발전소 건설에 앞서 1969년 6월부터 1970년 3월까지 수행된 해양학적 조사의 일환으로 부지 주변의 5곳에서 해조류 분포가 조사되었다(Choe & Chung 1970). 이 목록에 수록된 해조류 141종 가운데 발전소가 위치한 고리 연안에서는 총 133종(녹조류 22종, 갈조류 39종, 홍조류 72종)이 출현하는 것으로 조사되었다. 이후 발전소 1호기의 건설이 마무리되고 상업운전을 시작한 1978년 4월을 전후하여 1977년 6월부터 1978년 12월까지 6회에 걸쳐 발전소 방파제에서 수행된 해조류 조사에서는 총 102종(남조류 3종, 녹조류 16종, 갈조류 30종, 홍조류 53종)이 관찰되었다(김과 이 1980). 이 가운데 1969~1970년의 조사에서 밝혀진 해조류의 생육을 재확인한 종은 모두 71종(녹조류 11종, 갈조류 20종, 홍조류 40종)으로, 이는 1969~1970년에 고리 연안에서 조사된 해조류 133종의 53%에 불과한 수준이다.

한편 서해안에 위치한 영광원자력발전소 1·2호기는 1980년 12월에 동시에 착공되었는데, 건설 이전인 1979년 6월부터 1980년 4월까지 5회에 걸쳐 발전소 부지

주변 연안에서 조사된 해조류는 총 55종(남조류 1종, 녹조류 10종, 갈조류 14종, 홍조류 30종)이었다(한국원자력연구소 1980). 이후 1호기가 준공된 1986년 8월을 전후한 1986년 5월~1987년 2월의 4회에 걸친 조사에서 발전소 취수구와 배수구 주변 그리고 인근의 월곡리에서는 총 68종(남조류 10종, 녹조류 9종, 갈조류 13종, 홍조류 36종)이 관찰되었다(김과 유 1992). 발전소 건설 이전에 조사된 해조류와 공통적으로 생육을 확인한 종은 33종으로 1979~1980년에 밝혀진 해조류 55종의 60%에 불과한 수준이며, 반면에 추가로 관찰된 종은 35종이었다.

이렇게 두 원자력발전소에서 건설을 전후하여 많은 종이 사라지고 그 대신 새로운 종이 다수 출현하였다는 사실은 장기간에 걸친 각종 건설공사로 말미암아 부지 주변의 해조식생이 크게 변모하였음을 시사하는 것이다. 그밖에 동해안의 월성이나 울진원자력발전소 주변에서도 건설을 전후하여 해조류 분포 조사가 수행되기는 하였지만(Kim & Lee 1981; 한국원자력연구소 미발표자료), 이들 모두 2~3개월에 걸친 단편적인 조사에 그치고 있어서 발전소의 건설에 따른 영향을 상세하게 파악하기는 어려운 실정이다.

발전소의 가동이 해조류에 미치는 영향

원자력발전소가 준공되어 정상 가동하게 되면 필연적으로 다량의 온배수가 주변으로 방출된다. 원자력발전소는 화석 연료를 사용하는 화력발전소보다 열효율(thermal efficiency)이 낮다. 그것은 원자력발전이 화력발전보다 낮은 250~300°C의 온도 조건과 $4.2 \times 10^5 \text{ kg cm}^{-2}$ 의 낮은 압력 조건에서 작동하기 때문이며, 열 소비율은 $2,600 \text{ kg cal kWh}^{-1}$ 가 된다. 따라서 화력발전소의 경우와 같은 양의 열이 전기로 변환되지만, 화력발전보다 약 50% 이상의 더 많은 열이 제거되어야 한다(Langford 1990).

취수원으로부터 펌프로 올린 냉각수는 복수기(condenser)를 거치는 동안 수온이 급격하게 변화하는데, 대부분의 발전소에서 2~3분 또는 그보다 짧은 기간에 8~15°C의 수온 상승이 일어난다(IAEA 1974). 이러한 변화는 자연 서식처에서 일어날 수 있는 수온 변화의 폭 보다 훨씬 큰 것이다. 수온의 하강은 온배수 방출 방식에 따라 좌우된다.

1992년 겨울부터 1998년 가을까지 7년간 동해안의 3개 원자력발전소의 복수기 입구와 출구의 수온을 계절별로 비교한 결과는 Fig. 1과 같다(한국전력공사 1993~1999). 발전소가 가동하지 않은 계획예방 정비 중인

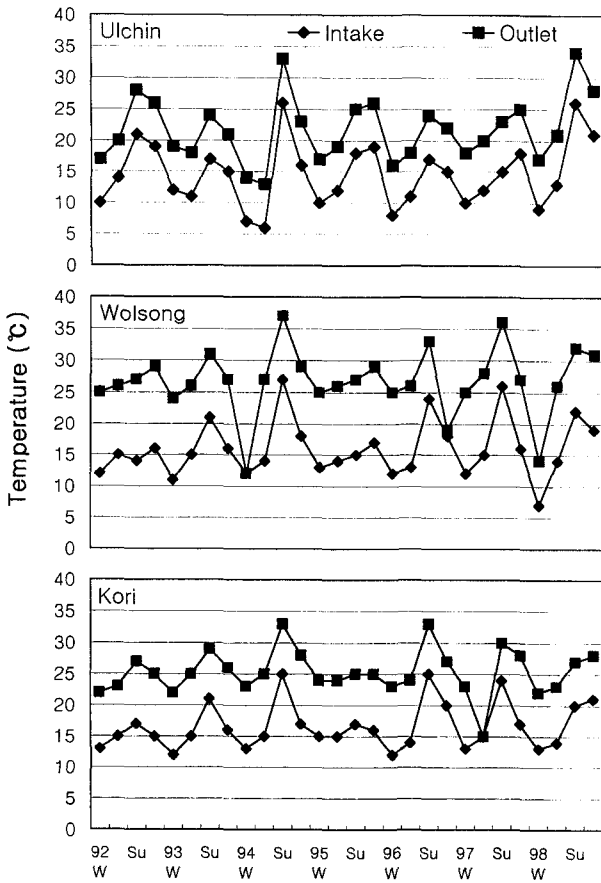


Fig. 1. Comparison of water temperatures measured at the intake and outlet of the condenser of three nuclear power plants in the east coast of Korea during 1992~1998 (Korea Electric Power Cooperation 1993~1999).

기간을 제외하고 복수기 입·출구의 온도차 (ΔT 또는 δT)는 7~12°C에 달하며, 특히 자연 수온이 높은 여름에는 복수기를 통과한 냉각수의 온도가 30°C 이상에 이르게 된다.

온배수는 주변 수역과 인근의 식물상 및 동물상에 영향을 미칠 수 있는 다음과 같은 몇 가지 물리적 성질을 갖는다 (Krenkel & Parker 1969; Langford 1990). 먼저 온배수의 높은 온도는 주변 수역의 온도를 변화시키고, 속도는 배출구 주변 해류의 방향과 속도를 변화시킬 수 있다. 이에 따라 배출구 주변의 침전물이 변화할 수 있는데, 이는 주로 배수가 와류(eddy)를 일으키는 곳에서 수중 침식을 유발하기 때문이다. 한편 온배수는 밀도가 낮고 따라서 부력이 증가하기 때문에 열적 성층(thermal stratification)과 때로는 화학 성층(chemical stratification)을 일으킨다. 이는 또한 수역 깊은 곳에서 자연적으로 밀도에 의하여 유발되는 물의 흐름을 변화시킬

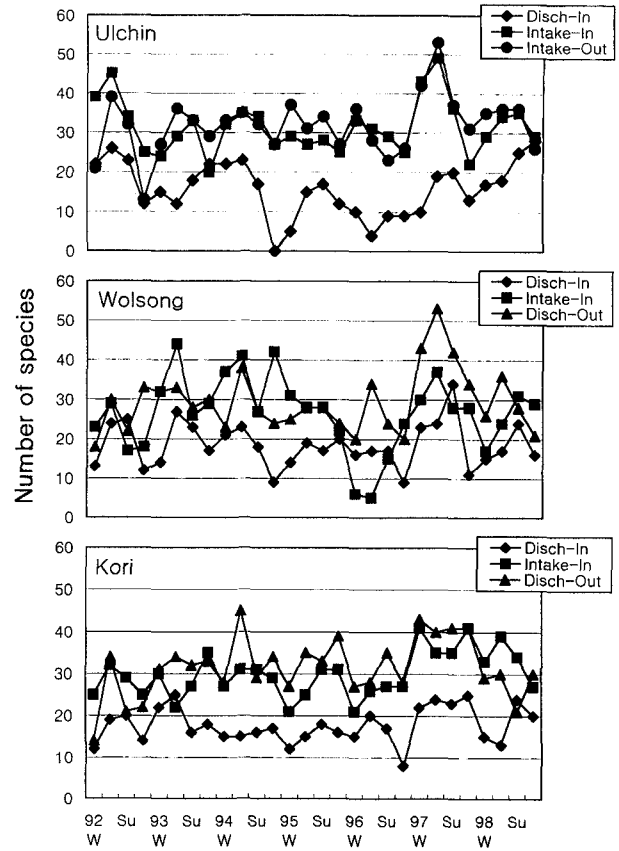


Fig. 2. Seasonal fluctuation of the number of algal species found at the discharge canal (Disch-In), inside of intake (Intake-In) and outside of discharge canal (Disch-Out) or outside of intake canal (Intake-Out) of three nuclear power plants in the east coast of Korea during 1992~1998 (Unpublished data of the author).

수 있다.

1. 정성적 측면

고착성 해조류의 분포를 결정짓는 가장 중요한 환경 요인은 해수의 온도이다 (Gessner 1970; van den Hoek 1982a, b). 이미 다양한 연구를 통하여 위도의 기울기에 따라 나타나는 저서성 해조군집의 종조성 변화가 해수 온도의 변화와 상관 관계를 갖는 것으로 나타났을 뿐만 아니라 (Murray & Littler 1981; Bolton & Anderson 1990), 실험실의 배양 실험 결과는 현장에서 나타나는 종별 지리적 경계의 원인을 잘 설명하고 있다 (Pakker *et al.* 1994, 1995).

원자력발전소 냉각계통의 가동에 따른 냉각수의 수온 상승은 고온에 적응하지 못하는 대부분의 해조류를 사멸시키거나 생장을 방해하는 것으로 조사되었다. 미국

Florida주 Turkey Point 발전소의 배수로 어귀에서는 정상적으로 출현하던 해조류와 잘피류(seagrass)의 식물상이 파괴되는 대신, 그 자리에 남조류가 출현하였다(Roessler 1971; Thorhaug *et al.* 1974). 그 영향역은 12~20 ha이고 바깥쪽의 8~10 ha가 다소 영향을 받는 구역이라고 보고되었다(Thorhaug 1974). Thorhaug 등(1974)은 이렇게 정상적인 식물상이 사라지는 주된 원인이 33°C가 넘는 온도 때문일 것으로 추정하고, +5°C 등온선 이내의 구역에서 정상적인 해조류가 사라진다고 보고하였다.

1986년 6월부터 1989년 1월까지 3년간 계절별로 서해안의 영광원자력발전소 주변에서 해조류 종조성을 조사한 결과 대조구역에서 83종이 출현한 반면 배수구역에서는 28종만이 관찰되었다(김과 김 1991).

동해안에 위치한 고리원자력발전소의 경우 발전소 배수로에 인접한 조사점의 해조류는 온배수의 영향을 다소 덜 받는 조사점과 비교하여 볼 때 종조성이 전반적으로 빈약한 것으로 나타나고 있다(김 1986; 김 등 1992). 1987년 4월부터 1989년 2월까지 고리원자력발전소 배수구 주변에서 해조류 분포를 조사한 결과, 배수구로부터 약 8 km 위치한 광역구역에서는 111종, 50~200 m 떨어진 중간구역에서는 61종, 그리고 배수구로부터 0~50 m의 근접구역에서는 41종의 해조류가 관찰되었다(김 1993). 이렇게 수온의 상승이 해조군집의 구조적 특성에 미치는 변화는 유사도(similarity)를 바탕으로 발전소 부근의 해조류 분포를 조사한 점들간의 집괴분석(cluster analysis)을 시행한 결과에서 배수구 부근의 점들이 다른 점들과 확연하게 구분되는 점으로도 뒷받침된다(김 등 1992).

동해안에 위치한 3개 원자력발전소(울진, 월성 및 고리)의 취수구 내면과 배수로 내면 그리고 배수구 외면(단 울진의 경우에는 취수구 외면)에서 1992~1998년에 걸쳐 계절별로 해조류 종조성을 조사한 결과는 Fig. 2에 보인 바와 같다(저자의 미발표자료). 3개 발전소 모두 취수구 내면이나 배수구 외면(또는 울진의 경우 취수구 외면)에서는 계절 평균 30종 내외의 비교적 많은 종이 출현하였지만 온배수의 영향을 직접 받는 배수로 내면에서는 계절 평균 16~19종의 범위로 적었으며, 3개 발전소 모두에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다($p < 0.01$).

그렇지만 이와 같은 해조류 다양성의 감소는 대체로 배수구 부근 200 m 이내(김 1993) 또는 100 m 이내(김 등 1999)의 연안에서 관찰되고 있다. 이는 온배수가 빠른 유속으로 방출되면서 외해 쪽으로 흐르게 되고 이에 따라 주변의 자연적인 온도를 지닌 해수가 배수구 주변

연안으로 끌려오기 때문이다(Kim 1983).

한편 원자력발전소의 취수구와 배수로에 공통적으로 생육하는 해조류 개체군의 비교형태학적 조사 결과, 발전소 냉각계통의 가동이 개체군 수준에서 성장률과 성장주기에 영향을 주는 것으로 밝혀졌다(김과 최 1995). 동해안의 울진원자력발전소를 대상으로 수행된 조사에서 홍조식물 붉은까막살(*Prionitis cornea*) 개체군의 형태를 비교한 결과, 가을과 겨울에는 모든 측정 자료에서 취수구 집단이 배수로 집단보다 높게 나타났고, 대부분의 항목에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 그러나 봄과 여름에는 이와 반대로 배수로 집단이 취수구 집단보다 대부분의 항목에서 높았다. 부챗살(*Ahnfeltiopsis flabelliformis*)의 형태 측정 결과는 모든 계절에 걸쳐 배수로의 개체군이 취수구 개체군보다 체장, 분지수, 개체의 현존량 그리고 하부 폭에서 높은 것으로 나타났다. 특히 배수로의 개체군은 봄과 여름 사이의 성장률이 매우 높아 체장, 분지수, 개체의 현존량에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 이는 동일한 종이라 할지라도 발전소 취·배수로에 생육하는 해조류 개체군이 물리적 환경의 차이에 따라 서로 다른 성장주기와 성장률을 보이게 됨을 시사하는 것이다.

2. 정량적 측면

온배수 영향역에서는 종조성의 변화 뿐만 아니라 출현종의 피도(cover)나 생물량 또는 수직분포가 바뀌면서 군집구조의 변화가 관찰된다. Maine Yankee 발전소에서 온배수의 영향을 받는 구역에서는 발전소 가동 전에 우점하였던 대형 갈조식물 *Ascophyllum nodosum*의 수직적 분포 구역이 감소하면서 하부 연안대(sublittoral zone)의 종들이 연안대(littoral zone)로 분포를 확장하였다(Vadas *et al.* 1976). 정상적으로 조간대 중부에서 발견되는 해조류들이 온배수의 영향을 받는 곳에서는 조간대 하부의 바위까지 분포역을 확장하기도 한다. 이와 같은 변화는 온배수 방출구로부터 100 m 이내에서 나타나며 온배수에 의하여 조간대에서 물에 잠기는 양상이 변화하기 때문으로 추정된다(Langford 1990).

1978년 4월에 상업운전을 시작한 고리원자력발전소 1호기 배수구 주변에서는 우점종 홍조식물 작은구슬산호말(*Corallina pilulifera*)의 피도가 1977년에 비하여 1978년에 증가한 반면, 1977년의 피도 조사에서 배수구 주변에서 우점종으로 기록되었던 홍조식물 참도박(*Pachymeniopsis elliptica*)의 피도가 1978년에 현저하게 감소하였다(김과 이 1980).

한편 서해안의 영광원자력발전소 1호기는 1986년 8월에 가동을 개시하였는데 가동 전인 1986년 5월에 배

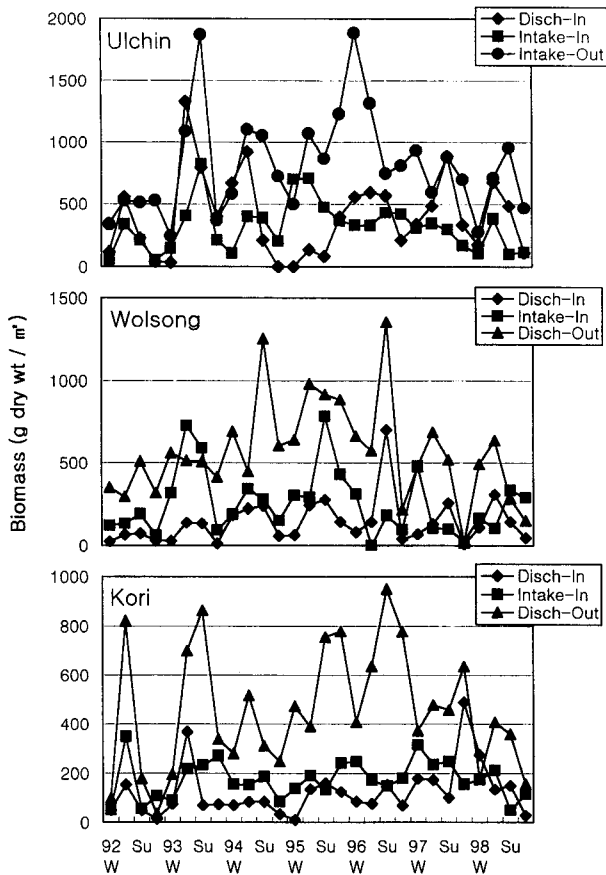


Fig. 3. As Fig. 2, but of the mean biomass values (Unpublished data of the author).

수로에서는 단위면적당 평균 생물량이 136 g dry wt m⁻²로 다소 높게 측정되었으나 가동을 전후한 8월에는 23 g dry wt m⁻²로 낮아졌고, 이후 1986년 11월과 1987년 2월에는 배수로에서 현존량을 측정할만한 식생을 발견할 수 없었다(김과 유 1992). 배수구 앞의 암반에서도 빈약한 식생이 관찰되고 있어서 1995년 10월부터 1996년 8월에 걸쳐 계절별로 영광원자력발전소 주변의 해조류 생물량을 조사한 결과, 배수구 앞 암반의 연평균 생물량은 51 g dry wt m⁻²로 북쪽에 위치한 상록해수욕장의 연평균 296 g dry wt m⁻²의 약 17%에 불과한 수준이었다(김과 허 1998).

동해안에 위치한 3개 원자력발전소(울진, 월성 및 고리)의 취수구 내면과 배수로 내면 그리고 배수구 외면(단 울진의 경우에는 취수구 외면)에서 1992~1998년에 걸쳐 계절별로 해조류 생물량을 조사하여 비교한 결과는 Fig. 3에 보인 바와 같다(저자의 미발표자료). 3개 발전소의 온배수가 흐르는 배수로 내면에서는 계절 평균 114~142 g dry wt m⁻²의 범위로 나타났는데, 이는 냉각

수가 유입되는 취수구 내면이나 외면에 면한 배수구 외면(울진의 경우 취수구 외면)의 경우보다 훨씬 적은 수준이다($p < 0.01$).

이렇게 온배수의 영향을 직접적으로 받는 곳에서 해조류 출현종이 감소하고 생물량이 줄어들면서 종 다양성지수도 낮게 나타나고 있다. 즉 1987년 4월부터 1989년 2월까지 고리원자력발전소 주변에서 종 다양도를 측정한 결과, 조간대의 조위가 높을 수록 그리고 배수구에 가까워질수록 종 다양성지수(H')가 낮아지는 경향을 보였다(김과 손 1993).

동일한 발전소 주변의 5개 정점(발전소 취수구 내면과 외면, 배수구 내면과 외면 그리고 대조구)에서 1991년 봄부터 1999년 봄까지 계절별로 조사한 해조류 종조성과 생물량 자료를 바탕으로 종 다양성지수(H')를 계산하였다. 그 결과, 정점별 계절 평균은 발전소 취수구 외면(1.45), 대조구(1.30), 취수구 내면(1.22), 배수구 외면(1.05) 그리고 배수구 내면(0.88)의 순으로 나타나서 온배수가 흐르는 배수로에서 가장 낮았으며, 각 정점의 평균은 통계적으로 매우 유의한 수준($p < 0.001$)에서 차이를 보였다(김 등 1999).

3. 내열종 해조류

종의 출현은 그 종이 요구하는 서식처의 다양한 환경요인이 적합한 것으로 추정할 수 있으며, 특히 해조류에 있어서 가장 중요한 환경요인으로 간주되는 온도 역시 그 예외는 아니다. 이러한 맥락에서 Abbott와 North(1971)는 미국 California주 연안의 해조류 가운데 20°C 이상 되는 해역에 생육하는 종류를 내열종(warm tolerant species)으로 보고한 바 있다.

온대 지방에 위치한 우리나라의 원자력발전소는 정상적인 가동이 이루어지면 대체로 20°C 이상의 온배수가 주변 해역으로 방출되며, 특히 자연 수온이 높은 여름에는 30°C 이상의 온배수가 방출되고 있다(Fig. 1). 따라서 연안수와 혼합되기 전의 배수로에 출현하는 해조류는 명백히 20~30°C의 높은 수온에서도 잘 견딜 수 있는 내열종으로 간주될 수 있다.

한국산 내열종 해조류의 목록은 김(1986)이 고리원자력발전소를 대상으로 1983년의 4계절에 걸쳐 1호기 배수로에서 11종(녹조류 2종, 갈조류 2종, 홍조류 7종)의 해조류 생육을 보고하면서 처음으로 그 규모가 밝혀지기 시작하였다. 그는 이들 해조류 가운데 납작파래(*Enteromorpha compressa*), 작은구슬산호말(*Corallina pilulifera*) 및 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, 갈조류 3종 그리고 홍조류 5종의 해조류가 1호기 배수로 또는 배수로 주변 조하대에 우점하고 있음을 밝혔고, 김 등(1998)은 1992~1997년의 자료를 종합하여 총 23종(남조류 1종, 녹조류 7종, 갈조류 5종, 홍조류 10종)의 내열종 해조류 목록을 정리한 바 있다.

국내 원자력발전소 가운데 온배수가 흐르는 배수로에서 해조식생을 거의 발견할 수 없는 영광원자력발전소를 제외하고 동해안에 위치한 3개 원자력발전소(울진, 월성 및 고리)의 배수로에서 1992~1998년에 걸쳐 계절별로 출현한 해조류 중 출현빈도 20% 이상(6회 이상)으로 관찰된 해조류 목록은 Table 1과 같다(저자의 미발표자료). 동해안에 위치한 3개 원자력발전소에서 출현한 내열종 해조류는 총 35종(남조류 4종, 녹조류 9종, 갈조류 8종, 홍조류 14종)으로, 녹조식물 갈파래과(Ulva-ceae)가 6종으로 가장 많고 홍조식물 산호말과(Coralinaceae)가 5종이었다. 이 가운데 3개 원자력발전소 모두에서 공통적으로 확인된 내열종은 남조류 1종, 녹조류 4종, 갈조류 3종 및 홍조류 7종의 총 15종인데 (Table 1), 이들 대부분은 발전소 배수로에만 국한하여 출현하기보다는 우리나라의 모든 해역에 널리 분포하는 보편적 출현종들이다(Kang 1966).

일반적으로 온배수의 유입이 이루어지는 수역에서는 남조류의 우점군집이 특징적으로 나타난다는 외국의 보고가 있다(Patrick 1974; Thorhaug 1974). 동해안의 3개 원자력발전소를 대상으로 28회에 걸쳐 수행된 조사에서 출현빈도 20% 이상 출현한 내열종 해조류 목록에 남조류가 4종이 포함되기는 하였지만 (Table 1), 생물량을 측정할만한 남조류는 전혀 발견할 수 없었다. 서해안의 영광원자력발전소를 대상으로 수행된 해조류 분포 조사에서도 남조류의 우점적인 출현을 찾아 볼 수 없다(김과 김 1991; 김과 유 1992; 김과 허 1998).

일반적으로 대부분의 해조류가 사라지는 40°C의 온도 조건에서 링비아 무리(*Lyngbya* spp.), 흔들말 무리(*Oscillatoria* spp.), 마디다발 무리(*Microcoleus* spp.) 등 남조류가 번무하는 것으로 알려지고 있지만(Langford 1990), 우리나라에 건설된 원자력발전소에서 40°C 내외의 온배수가 방출되는 경우는 거의 없다. 따라서 한국 연안에서는 온배수가 유입되는 수역에서도 남조류의 우점군집이 발달하지 않는 것으로 판단된다.

한편 온배수가 흐르는 배수로에서도 다소나마 해조류의 천이 현상이 진행되고 있는 것으로 밝혀졌다(김 등 1998). 물론 배수로의 해조식생을 결정짓는 가장 중요한 환경요인은 온도를 들 수 있으나, 배수로의 유수량 역시 해조군집의 종조성과 생물량을 좌우하는 중요한 요인이

Table 1. List of warm-tolerant algae found at discharge canal of three nuclear power plants in the east coast of Korea (Unpublished data of the author)

Species	Ulchin	Wolsong	Kori
Cyanophyta			
<i>Lyngbya confervoides</i>		+	
<i>Microcoleus chthonoplastes</i>	+	+	+
<i>Oscillatoria brevis</i>		+	+
<i>O. nigro-viridis</i>	+	+	+
Chlorophyta			
<i>Enteromorpha compressa</i>	+	+	+
<i>E. intestinalis</i>			+
<i>E. linza</i>	+	+	+
<i>E. prolifera</i>	+	+	+
<i>Ulva conglobata</i>		+	+
<i>U. pertusa</i>	+	+	+
<i>Urospora penicilliformis</i>		+	
<i>Cladophora albida</i>		+	
<i>Derbesia marina</i>			+
Phaeophyta			
<i>Ectocarpus arctus</i>	+	+	
<i>Colpomenia sinuosa</i>	+	+	+
<i>Sphacelaria lutea</i>	+	+	
<i>Dictyota dichotoma</i>	+		
<i>Padina arborescens</i>	+	+	+
<i>Sargassum fulvellum</i>		+	
<i>S. horneri</i>	+	+	+
<i>S. micracanthum</i>	+		+
Rhodophyta			
<i>Stylonema alsidii</i>		+	
<i>Bangia atropurpurea</i>		+	
<i>Gelidium divaricatum</i>	+	+	+
<i>Pneophyllum zostericolum</i>	+	+	+
<i>Amphiroa ephedraea</i>	+		
<i>A. zonata</i>	+	+	+
<i>Corallina officinalis</i>	+		+
<i>C. pilulifera</i>	+	+	+
<i>Grateloupia filicina</i>		+	+
<i>Prionitis cornea</i>	+	+	+
<i>P. ramosissima</i>		+	+
<i>Caulacanthus usutulatus</i>	+	+	+
<i>Hypnea charoides</i>		+	
<i>Ahnfeltiopsis flabelliformis</i>	+	+	+

되고 있다(Langford 1990). 이를테면 고리원자력발전소 1호기에서 1987년 봄에 냉각수의 유량이 하루 300톤 이상일 때 파래 무리(*Enteromorpha* spp.)가 증가하고 갈조 팽생이모자반(*Sargassum horneri*)도 1m 크기의 개체들이 관찰되었으나, 발전소의 가동을 중지한 계획 예방장비 중인 시기인 1988년 봄에는 유량이 크게 감소하면서 파래 군락도 형성되지 않았고 단지 민산호말 무리(무절석회조류, melobesioidean algae)만이 분포하였다

(김 등 1992).

고리원자력발전소와 같이 가압경수형(PWR) 원자로가 설치된 발전소에서는 원자로의 특성상 정기적으로 1년에 한 달 내외의 기간 동안 원자로의 가동을 중지하고 예방정비를 실시하고 있으며, 이 기간에는 냉각수의 방출 역시 거의 중단된다. 이렇게 수온이 상승되지 않고 냉각수의 유량도 현저하게 감소하는 등 환경의 급격한 변모는 배수로에 서식하던 해조류에게 있어 크나큰 교란입에 틀림없고, 따라서 일년 중 어느 계절에 이러한 정비 시기가 해당하는 지도 배수로 해조류의 분포를 결정하는 중요한 요인이 되는 것으로 추정된다(김 등 1998).

결 론

원자력발전은 발전량을 기준으로 우리나라 전체의 약 42%를 점하는 가장 중요한 발전원이 되고 있다. 대용량 원자력발전소가 연안에 건설되고 가동되면 주변 연안의 저서 해조류에게 다각적인 효과를 미치게 된다. 특히 냉각계의 설계에 있어서 국내에 건설된 모든 원자력발전소는 관류냉각방식을 취하고 있어서, 복수기를 통과한 냉각수를 주변 해역으로 직접 방류하고 있는 실정이다.

원자력발전소 냉각계의 가동은 먼저 해조류 개체군 수준에서 성장률과 성장주기에 영향을 주는 것으로 판단된다(김과 최 1995). 이러한 효과는 나아가서 군집 수준에도 영향을 미치게 되어 온배수의 영향을 받는 곳에서 출현종수는 대체로 감소하는 대신 일부 고온에 적응할 수 있는 새로운 종이 출현할 뿐만 아니라(김과 이 1980; 김 1986), 종간 경쟁이 줄어든 상황에서 몇몇 내열종이 오히려 풍부하게 나타나고 있다(김 등 1998).

이제까지 조사된 결과를 종합해 볼 때 해조류 다양성의 감소가 대체로 배수구 부근 200 m 이내 또는 100 m 이내의 연안에서 관찰되고 있지만, 외해 쪽으로 흐르는 온배수가 주변 수역에서 빠른 유속을 만날 경우 그 영향이 다소 멀리까지 확장될 가능성을 배제할 수 없다. 특히 발전소 부지의 새로운 입지 선정에 난관을 겪고 있는 우리나라에서는 기존의 부지에 다수기를 건설할 예정인 바, 이들 후속기가 추가로 가동될 때 추가되는 냉각수량에 기인하여 온배수 확산 범위는 더욱 확장될 것이다. 우리나라 연안에서 양식하고 있는 대부분의 유용 해조류들이 대체로 낮은 온도에서 활발하게 생육하고 있음을 고려해 볼 때(강과 고 1977), 자연 수온보다 높은 온도를 지닌 수괴가 해조류 양식장으로 확산되는 것은 결코 바람직하지 않다.

따라서 원자력발전소로부터 주변으로 방출되는 열을

저감시킬 수 있는 방안을 모색함이 필요하다고 본다. 즉 원자력발전소의 냉각 계통에 있어서 복수기 내에서 증발열을 흡수한 냉각수를 주변으로 직접 방출하는 현재의 관류냉각방식(직접냉각방식)으로부터 폐열을 주변 환경으로 직접 내보내지 않는 재순환냉각방식(간접냉각방식)으로 전환함이 바람직하다(김 1983; Langford 1990). 그 예로는 냉각수로 또는 냉각운하를 건설하거나, 냉각연못 또는 분무연못을 만드는 방안 그리고 냉각탑을 세우는 방안 등이 있다.

한편 복수기 냉각수가 주변에 미치는 영향을 감소시키기 위한 대안으로써 배수되기 전에 추가적인 냉각수로 혼합 희석시키거나, 온배수 층의 범위를 줄이기 위하여 분사식 확산기(jet diffuser) 또는 다공 확산기(multiport diffuser)를 사용하는 방안 그리고 배수되는 수역보다 깊은 수역의 차가운 물을 취수하여 냉각수로 사용하는 방법들 역시 검토될 수 있다(IAEA 1974; 김 1983). 그렇지만 이들 방안도 나름대로 또 다른 측면에서 생태적 효과를 미칠 수 있으므로(Langford 1990), 이에 대한 충분한 연구와 검토가 필요하다.

참 고 문 헌

- 강제원, 고남표(1977) 해조양식. 대화출판사, 부산.
- 김영환(1983) 원자력발전에 수반되는 온배수의 방출이 주변 해양생태계에 미치는 영향연구. 기술현황분석보고서, 한국 원자력연구소, 서울.
- 김영환(1986) 고리원자력발전소 주변 해조류에 관한 연구 2. 1983년의 해조류 식생. 조류학회지 1: 241-249.
- 김영환, 김형근, 오윤식(1999) 원전 온배수에 의한 해저식물의 영향 연구. '99 전력연-단526. 전력연구원, 대전.
- 김영환, 엄희문, 강연식(1998) 한국산 내열종 해조류의 정성·정량적 분석 I. 고리원자력발전소. 조류학회지 13: 213-226.
- 김영환, 유종수(1992) 서해안 영광원자력발전소 주변의 해조 식생. 환경생물학회지 10: 100-109.
- 김영환, 이정호(1980) 고리원자력발전소 주변 해조류에 관한 연구 1. 1977~1978년의 해조군집의 변화. 식물학회지 23: 3-10.
- 김영환, 최상일(1995) 발전소 냉각계통이 해조 식생에 미치는 영향. 조류학회지 10: 121-141.
- 김영환, 허성희(1998) 서해안 영광원자력발전소 주변 해조군집의 종조성과 생물량. 한수지 31: 186-194.
- 김형근(1993) 고리 원자력발전소 연안 해조군집의 종조성과 계절변화. 강릉대학교 동해안지역연구 4: 12-19.
- 김형근, 강래선, 손철현(1992) 고리 원자력발전소 연안의 해조군집에 대한 온배수의 영향. 조류학회지 7: 269-279.
- 김형근, 손철현(1993) 온배수 지역 조간대 해조군집의 종 다양도. 강릉대학교 동해안지역연구 4: 20-26.

- 김흥기, 김영환(1991) 한국 3개 원자력발전소 주변 해조군집. 조류학회지 6 : 157-192.
- 한국원자력연구소(1980) 부지환경조사보고서: 원자력발전소 7, 8호기. 한국원자력연구소, 서울.
- 한국전력공사(1993) 원자력발전소 주변환경 조사보고서 - 일반환경('92). KRC-단93-006. 한국전력공사 기술연구원, 대전.
- 한국전력공사(1994) 원자력발전소 주변환경 조사보고서 - 일반환경('93). KRC-단94-007. 한국전력공사 기술연구원, 대전.
- 한국전력공사(1995) 원자력발전소 주변 환경조사 및 평가보고서 - 일반환경('94). KRC-단95-31. 한국전력공사 기술연구원, 대전.
- 한국전력공사(1996) 원자력발전소 주변 환경조사 및 평가보고서 - 일반환경('95). '96 전력연-단41. 한국전력공사 전력연구원, 대전.
- 한국전력공사(1997) 원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서(1996년보). '97 전력연-단233. 한국전력공사 전력연구원, 대전.
- 한국전력공사(1998) 원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서(1997년보). '98 전력연-단235. 한국전력공사 전력연구원, 대전.
- 한국전력공사(1999) 원자력발전소 주변 일반환경 조사 및 평가보고서(1998년보). '99 전력연-단270. 한국전력공사 전력연구원, 대전.
- Abbott IA & WJ North(1971) Temperature influences on floral composition in California coastal waters. *Proc. Intl. Seaweed Symp.* 7 : 72-79.
- Adams JR(1969) Ecological investigations related to thermal discharges. Pacific Coast Electrical Associations, Los Angeles.
- Blake NJ, LJ Doyle & TE Pyle(1976) The macrobenthic community of a thermally altered area of Tampa Bay, Florida. pp. 296-301. In *Thermal Ecology II* (Esch GW & RW McFarlane eds). Technical Information Center, Energy Research and Development Administration, Springfield.
- Bolton JJ & RJ Anderson(1990) Correlation between intertidal seaweed community composition and sea water temperature patterns on a geographical scale. *Bot. Mar.* 33 : 447-457.
- Choe S & TW Chung(1970) Oceanological studies for the construction of the Kori nuclear power plant. CI 47-109. Korea Institute of Science and Technology, Seoul.
- Gessner F(1970) Temperature: Plants. pp. 363-406. In *Marine Ecology* (Kinne O ed.), Vol. 1, Part 1. Wiley, New York.
- Glasstone S & WH Jordan(1980) Nuclear Power and Its Environmental Effects. American Nuclear Society, Ill.
- 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.
- Kang JW(1966) On the geographical distribution of marine algae in Korea. *Bull. Pusan Fish. Coll.* 7 : 1-125.
- Kim KH(1983) Assessment of the thermal impact of Kori nuclear power plant operations. Technical Report, The University of Tennessee, Knoxville.
- Kim YH & JH Lee(1981) Intertidal marine algal community and species composition of Wolseong area, East Coast of Korea. *Korean J. Bot.* 24 : 145-158.
- Krenkel PA & FL Parker(1969) Engineering aspects, sources and magnitude of thermal pollution. pp. 10-52. In *Biological Aspects of Thermal Pollution* (Krenkel PA & FL Parker eds). Vanderbilt University Press, Portland.
- Langford TEL(1990) Ecological Effects of Thermal Discharges. Elsevier Appl. Sci., London.
- Murray SN & MM Littler(1981) Biogeographical analysis of intertidal macrophyte floras of southern California. *J. Biogeogr.* 8 : 339-351.
- Naylor E(1965) Effects of heated effluents upon marine and estuarine organisms. pp. 63-103. In *Advances in Marine Biology* (Russell FS & M Yonge eds). Academic Press, London.
- North WJ(1969) Biological effects of a heated water discharge at Morro Bay, California. *Proc. Intl. Seaweed Symp.* 6 : 275-286.
- Oh YS, IK Lee & SM Boo(1990) An annotated account of Korean economic seaweeds for food, medical and industrial uses. *Korean J. Phycol.* 5 : 57-71.
- Pakker H, AM Breeman, WF Prud'homme van Reine & C van den Hoek(1995) A comparative study of temperature responses of Caribbean seaweeds from different biogeographic groups. *J. Phycol.* 31 : 499-507.
- Pakker H, WF Prud'homme van Reine & AM Breeman(1994) Temperature responses and evolution of thermal traits in *Cladophoropsis membranacea* (Siphonocladales, Chlorophyta). *J. Phycol.* 30 : 777-783.
- Patrick R(1974) Effects of abnormal temperatures on algal communities. pp. 335-349. In *Thermal Ecology* (Gibbons JW & RR Sharitz eds). Technical Information Center, U.S. Atomic Energy Commission, Springfield.
- Roessler MA(1971) Environmental changes associated with a Florida power plant. *Mar. Pollut. Bull.* 2 : 87-90.
- Thorhaug A(1974) Effect of thermal effluents on the marine biology of southeastern Florida. pp. 518-531. In *Thermal Ecology* (Gibbons JW & RR Sharitz eds). Tec-

- Technical Information Center, U.S. Atomic Energy Commission, Springfield.
- Thorhaug A, D Segar & MA Roessler (1974) Impact of a power plant on a subtropical estuarine environment. *Mar. Pollut. Bull.* **5** : 166-169.
- Vadas RL, M Keser & PC Rusanowski (1976) Influence of thermal loading on the ecology of intertidal algae. pp. 202-212. *In* Thermal Ecology II (Esch GW & RW McFarlane eds). Technical Information Center, Energy Research and Development Administration, Springfield.
- van den Hoek C (1982a) Phytogeographic distribution groups of benthic marine algae in the North Atlantic Ocean. A review of experimental evidence from life history studies. *Helgol. Meeres.* **35** : 153-214.
- van den Hoek C (1982b) The distribution of benthic marine algae in relation to the temperature regulation of their life histories. *Biol. J. Linn. Soc.* **18** : 81-144.

Effects of Construction and Operation of Nuclear Power Plants on Benthic Marine Algae

Young Hwan Kim

(School of Life Sciences, Chungbuk National University, Chongju 361-763, Korea)

Abstract - During the past several decades, electricity generating plant increased with remarkable rapidity in Korea. Recently the increase has been much more rapid as the rate of industrialization has accelerated. Construction of nuclear power plants in coastal areas inevitably caused the perturbation of critical coastal habitats and thus influenced marine algal species composition. Particularly, an increase in the building of nuclear power plants led the amounts of heat discharged to increase exponentially. As far as the effects of cooling water and thermal discharges are concerned, benthic marine algae are likely to be vulnerable to a discharge. Heated effluents from nuclear power plants, with the temperature rises of 7~12°C under normal operating and design conditions, are discharged through the discharge canal and into natural water bodies. It is clear that the characteristic marine algal community is developed in the area affected by the thermal discharges; i.e. low species richness and low species diversity. Nevertheless, it is worthwhile to note that elevated temperatures exert differential effects depending on the algal populations. Benthic marine algae grown at the discharge canal can be regarded as warm tolerant species. 35 species (4 blue-green, 9 green, 8 brown and 14 red algae) of marine algae occurred more than 20% frequency at discharge canal of three nuclear power plants in the east coast during 1992~1998 and thus can be categorized as warm tolerant species in Korea. To minimize the ecological impacts of waste heat on benthic marine algae, it is recommended that, in the future, nuclear power plants will have to employ some form of closed-cycle cooling for the condensers. [Nuclear power plant, Construction, Operation, Ecological effects, Benthic marine algae].