Korean J. Environ. Biol. 17(1) : 1~9 (1999)

〈총 설〉

자외선이 해조류에 미치는 영향에 관한 고찰

한 태 준

(인천대학교 자연과학대학 생물학과)

적 요 - 산업활동의 부산물인 chlorofluorocarbons(CFCs)와 같은 물질들의 대기권 유입으로 오존층의 파괴가 극심해짐에 따라 자외선의 지표유입량이 증가되는 추세를 보이는데, 특히 중파자외선의 증가는 DNA, 단백질, 지질 등에 의한 흡수를 통하여 생물학적 폐해를 야기할 수 있다는 점에서 주목된다. 최근 측정 결과 우리 나라 동해안에서 해수표면에 도달되는 중파자외선 광량의 1%가 수심 10 m까지 침투하는 것으로 나타났는데, 이는 해양생태계 생산성의 대부분이 해양 수심의 상위 2.5%에 해당되는 투광대에 의존한다는 점을 감안할 때 자외선에 의한 막대한 생태학적 폐해를 예견하게 해준다. 실내배양실험 연구에서 중파자외선은 대형해조류의 생장 및 광합성을 억제하고 광합성 색소를 파괴하는 등의 생물독성학적 효과를 보였다. 반면, 자외선의 피해로부터 해조류를 보호해 주는 몇 가지 기작이 밝혀진 바 있는데, 어린시기의 갈조류 다시마는 청색광에 의한 광재활성화 능력을 함유한 것으로 보이고, 한국산 녹조 구멍갈파래와 홍조 도박류에서는 자외선을 강하게 차단하는 흡수물질이 형성됨을 알 수 있었다. 그러나 이러한 적응기능들이 해조류에서 보편적으로 나타나는 것인지에 대해서는 좀 더 연구가 필요하다. 해양생태계는 대기 중 CO_2를 이용하여 1년에 약 100 Gt의 유기물질을 생산해내고, 인류가 소비하는 식품의 30%를 제공한다는 점에서 자외선에 의한 생물량의 감소는 해조류 뿐만 아니라 먹이망에 의해서 복잡한 연결구조를 지닌 생태계 전체의 붕괴를 야기할 수 있는 심각한 사안이라고 할 수 있다. 따라서, 자외선에 대한 피해를 연구 평가하여 전략을 세우고 이를 예측하는 예보시스템을 개발할 필요성이 절실히 부각된다.

서 론

태양에서 방출되는 전자기파는 광범위한 영역의 파장을 함유하는데, 그 중에서 특히 190~400 nm 파장영역에 있는 광선을 자외선(Ultraviolet Radiation; UVR)이라고 칭한다. 자외선은 파장의 길이에 따라 장파자외선(UV-A; 320~400 nm), 중파자외선(UV-B; 280~320 nm) 그리고 단파자외선(UV-C; 190~280 nm)이라는 세 개의 영역으로 구분된다(Caldwell 1981).

태양광선 스펙트럼은 대기를 투과하면서 대기중 성분에 의하여 변화되는 경향을 보이는데, 특히 UV-B와 UV-C는 오존분자에 의하여 강하게 흡수되므로 290 nm 이하의 자외선은 지표면에 거의 도달되지 않는다. 오존분자는 지구 대기 가스의 0.001%를 구성하고 주로 해발 10~50 km의 성층권에 집약적으로 분포한다. 현재 중위도 지방 성층권 대기내 오존의 총량은 1기압/0°C 하에서 집약시킬 경우 전체 대기의 두께를 수 km로 가정할 때 약 3.4 mm 두께에 해당된다(Häder & Worrest 1991).

최근에 산업활동의 부산물인 chlorofluorocarbons (CFCs)와 같은 물질들이 대기권에 유입되어 오존 분자를 급속도로 파괴함에 따라 자외선의 지표 유입량이 증가되는 추세를 보이는데, 오존층이 10% 감소되면, 태양에너지 유입량은 0.5% 증가되고, 그 때 자외선 투과량은 1% 증가한다고 한다(Rowland 1982). 다른 지역에 비하여 오존의 계절적인 감소 현상이 뚜렷하게 나타나는 남극 상공에서는 봄이 시작되는 시점에 성층 오존이 50%까지 감소되는 경향을 보인다(Smith *et al.* 1992).

중파자외선(UV-B)은 DNA, 단백질, 지질 등 생명활동에 있어서 매우 중요한 분자들에 의하여 쉽게 흡수되어 그러한 분자들에 상해를 입히는 성격을 지녔기에 그 양이 약간만 증가한다고 해도 심각한 생물학적 폐해를 야기시킬 수 있다. 실제로 중파자외선은 DNA에 구조적 이상을 일으키고 단백질의 트립토판, 트리오신, 페닐아닌 등의 성분에 의하여 강하게 흡수되어 단백질을 변형시

키기도 하며, 지질 성분을 감소시킴으로써 막계(membrane system)에 영향을 끼치는 것으로 보고된 바 있다(Kramer *et al.* 1991; Mitchell & Karenz 1993; Yu & Björn 1997).

지구 전체의 70%를 차지하고 있는 해양생태계에서는 대부분의 생산성이 평균 해양수심의 상위 2.5%에 해당되는 투광대(euphotic zone)에서 이루어진다고 할 수 있다. 얼마 전 까지만 해도 자외선이 해수를 투과할 때 그 양이 지수함수적으로 감소된다는 보고 때문에 해양환경은 자외선의 폐해로부터 안전지대에 있는 것으로 여겨졌으나, 최근 자외선 측정결과 외양에서는 중파자외선이 수심 30 m까지 침투하고 연안수의 경우에도 수 m에 이르는 깊이까지 상당량의 자외선이 도달된다고 한다(Jerlov 1950, 1976; Kirk 1994). 따라서, 중파자외선의 양적 증가현상은 해양생태계에도 막대한 생태학적 폐해를 초래할 것으로 예견된다.

우리 나라 연안 생태계에 대해서는 아직까지 자외선의 영향에 대한 평가가 양적으로든 질적으로든 체계적으로 이루어진 바가 없기에 본 논문은 우선, 환경요인이 통제된 가운데 해조류를 중심으로 이루어진 실험실 연구 결과를 토대로 우리 나라 해안의 일부 연안생태계에서 현재 그리고 미래에 전망되는 자외선 투과의 양적 증가현상이 가져올 수 있는 여러 가지 생물학적 결과들에 대하여 토론하고자 한다.

본 론

1. 대기의 물리적 · 광화학적 성격

해수면에 도달되는 광선은 주로 태양과 하늘에서 오는 방사에너지인데 이러한 태양광선은 대기중의 공기분자와 각종입자에 의한 산란과 대기가스(오존, 산소, 수증기 등)에 의한 흡수로 단파장 영역이 상당부분 제거된 형태의 특성을 띤다. 광선의 파장 분포는 태양고도와도 관계가 있는데, 태양고도가 낮으면 점차적으로 산란광선이 직사광선보다 우세하게 된다(Kirk 1994). 태양스펙트럼 중에서 가시광선영역(400～700 nm)은 공교롭게도 식물이 광합성에 이용할 수 있는 파장영역대로서 PAR (Photosynthetically Available Radiation)이라고도 하는데, PAR의 대기 투과율은 대기의 두께에 의해 크게 영향을 받지 않는다. 반면, 자외선은 오존분자에 의하여 강하게 흡수되기 때문에 태양각도 및 성층권 내에 존재하는 오존량의 총량 변화에 따라 지표유입량이 뚜렷하게 변화될 수 있다(Calkins & Thordardot 1980).

대기와 해수의 권계면에서 나타나는 반사작용도 UV-B 광량변화에 영향을 주는 중요한 요인이라고 할 수 있는데 이때 반사정도는 주로 태양고도와 해수면의 거친 정도(roughness)에 따라 달라질 수 있다(Preisendorfer 1976). 권계면에서 자외선 투과에 영향을 주는 또 다른 요인이라고 하면 미세층(microlayer)의 형성을 들 수 있는데, 이는 비교적 오염된 연안역에서 발견될 수 있는 것으로 해수 표층에 계면활성제, 친수성 및 소수성 물질이 모여서 이루어진 약 1 mm 두께의 층으로서 상당량의 광선을 흡수한다(MacIntyre 1974).

2. 해수의 광학적 성격

해수에는 용해성 물질(dissolved matter)과 입자성 물질(particulate matter)이 존재하여 자외선 흡수와 산란에 영향을 끼친다. 용해성물질 중 특히 유기물 분해과정에서 생성되는 Gelbstoff라고 하는 황색물질은 자외선 영역의 파장을 선택적으로 강하게 흡수하는 성격을 띠고 있는 반면, 입자성 물질은 파장선택적인 경향을 보이지 않고 주로 산란을 통하여 광선의 투과량을 감소시키지만 탁도가 심한 연안수에서는 어느 정도 광선의 파장별 재분포에 기여한다(Kirk 1994).

Jerlov(1976)은 부유물, 생산성, 그리고 황색물질의 정량적 특성에 따라서 해수의 광학적 성격을 외양수(oceanic water)와 연안수(costal water)로 구분해 놓은 바 있다. 수체의 광학적 성격은 부유입자물질과 용해유기물질 농도의 함수로 나타나는데, 외양수에서의 투과도는 전자에 의존하는 반면, 연안수의 경우 상당양의 황색용존물질이 투과도에 영향을 끼친다. 외양수와 연안수의 투과도 차이는 주로 자외선 영역에서 뚜렷하게 구분되며 이는 이미 언급되었듯이 황색용존물질에 의한 자외선 흡수로 인하여 나타나는 것이다. 식물이 광합성을 수행하는데 요구하는 광선의 양이 투과되는 깊이, 즉 해양수괴의 상부층을 투광대(photic zone)라고 일컫는데 투광대층의 범위는 주로 위도, 계절, 해수의 광학적 성격, 생물학적 활동에 의하여 결정된다. 투광대의 하한점은 표층 PAR의 1%가 도달되는 깊이로 정의되고, 우리 나라 동해안 해역의 연안수에서는 이러한 투광대 하한깊이가 20～24 m인 것으로 추정된다(Fig. 1). 자외선의 경우, 표면광량이 일정 수심에 도달되는 정도를 310 nm (UV-B)의 파장을 기준으로 계산해 보았을 때, 우리 나라 동해안의 연안수는 Jerlov(1976)이 분류한 외양수 III에 매우 유사한 것으로 나타났으며(Table 1), 수심 10 m까지도 표층 UV-B의 1%가 투과된다는 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 2).

UV-B/PAR 비율은 자외선 효과를 측정하는데 있어서 때로 매우 중요한 척도가 되는데, 그 이유는 광재활성화라고 일컬어지는 자외선 상해로부터의 회복반응에 있어

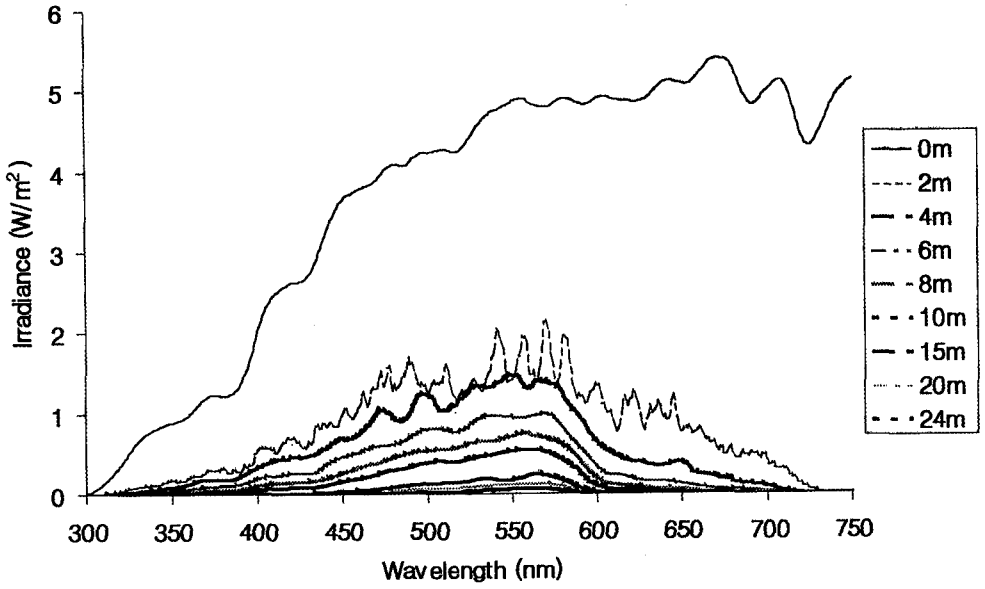

Fig. 1. Spectral distribution of solar radiation in the coastal waters off Anin-jin, Korea (July 11, 1998; Han, unpublished).

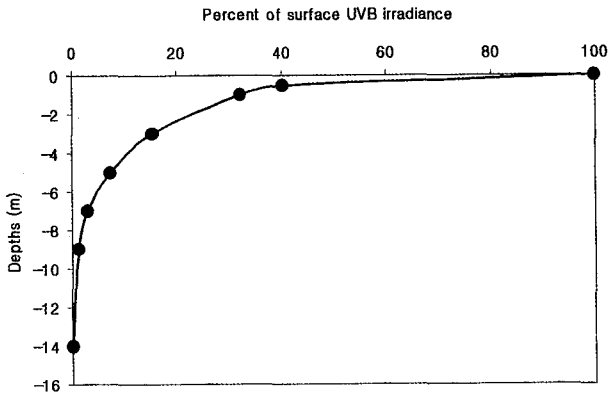

Fig. 2. Depth-dependent penetration of UV-B radiation (at 310 nm) in the coastal waters off Anin-jin, Korea (July 11, 1998; Han, unpublished).

서 단파장의 PAR이 매우 유효하게 작용하므로, 자외선과 PAR의 비율변화는 곧 자외선 극복기작의 효율성 변화를 의미할 수 있기 때문이다. 특히 자외선에 민감한 해조류의 경우, 광합성을 위해서 일정량의 PAR을 절대적으로 요구하면서 동시에 자외선으로부터 보호된 수심에 서식하게 됨에 따라 일정한 UV-B/PAR 환경에 적응하게 되는데, 자외선의 증가현상으로 UV-B/PAR 비율이 커지면 자외선으로부터 보호받을 수 있는 깊은 수심의 서식처를 선택할 수밖에 없는 상황에 놓이게 되고, 이런 경우 광영양생물에 필요한 PAR의 부족으로 광합성에 제약을 받아 정상적인 생육을 할 수 없게 된다는 딜레마(dilemma)에 빠지게 된다.

Table 1. Percent of surface irradiance as a function of depth and water type, calculated for a wavelength of 310 nm.

Depth (m)	Water types						
	Oceanic			Coastal			Sachon Waters (Korea)
	I	II	III	1	2	3	
0	100	100	100	100	100	100	**100**
1	86	80	50	16	9	3	**32.2**
2	74	64	25	2.6	0.8	0.1	**n/a**
3	64	51	13	0.4	0.1	--	**15.3**
4	55	41	6.3	0.1	--	--	**n/a**
5	47	33	3.1	--	--	--	**7.3**
10	23	11	0.1	--	--	--	**1.2**
20	4.9	--	--	--	--	--	--
30	1.0	--	--	--	--	--	--
10% irradiance depth	15.4	10.5	3.3	1.26	0.96	0.66	**3-5**

3. 해양생태계의 1차 생산성

해양생태계는 대기중 CO_2를 이용하여 일년에 90~100×10^9 tons의 유기물을 생산해낸다(Siegenthaler & Sarmiento 1993). 또한 해양생태계에서 나오는 어패류, 해조류 등은 인류가 소비하는 식품의 30%를 차지한다는 사실은 생물권(biosphere)에서 해양생태계가 차지하는 비중을 나타내주는 척도라고 할 수 있다. 생태계는 생산자인 독립영양식물로부터 시작되어 소비자인 일련

의 종속영양생물을 거쳐서 에너지가 전달되는 먹이연쇄라는 특성을 지니는데 먹이연쇄는 단순하게 조직되어 있지 않고 매우 복잡한 형태로 서로 연결되어 먹이망을 형성한다. 따라서, 정성적 관계를 살펴보면 소비자의 생물체량은 전적으로 생산자의 생산성에 의존한다고 할 수 있고, 같은 방식으로 소비자 단계가 올라갈수록 생산력이 감소하는 추세를 보여서 전체적으로 볼 때, 생태계의 먹이연쇄 구조는 생산력 측면에서 생산자를 기반으로한 피라미드 모양을 이룬다고 할 수 있다.

해양생태계에서 1차 생산자는 해조류와 식물플랑크톤을 예로 들 수 있다. 두 생물 집단간의 차이는 해조류가 부착성 식물로서 연안역으로 서식처가 제한된 반면, 식물플랑크톤은 부유성을 지니고 있기에 전 해양에 대규모적으로 분포하고 있다는 점이다. 이러한 견지에서 자외선과 해양생태계의 1차 생산성의 관계에 대한 대부분의 연구는 식물플랑크톤에 집중되어왔는데, 몇몇 해조류의 생산성을 조사해본 결과 육상생태계에서 보고된 그 어떤 생산성보다도 높은 생산성 수치를 나타냈고(Mann & Chapman 1975), 아울러 일정면적당 생산성이 1,000~2,000 gC/m²/yr로서 플랑크톤 생산력의 3배이상 된다는 사실이 최근에 보고된 바 있어서 1차 생산자로서 해조류의 입지를 강화시켰다고 할 수 있다(Mann 1972). 아울러 자외선 증가현상과 관련된 생물학적 반응을 추적하기 위해서는 실제로 자외선이 투과되는 지점에 서식하고 있는 생물을 대상으로 삼아야 할 것이고, 그러한 측면에서 운동성을 가지고 부분적으로나마 자외선을 회피할 수 있는 식물 플랑크톤의 경우보다는 기질에 고착된 채 부동의 상태에서 서식처에 도달되는 자외선의 변화에 전면적으로 노출될 수밖에 없는 해조류의 자외선 민감도를 조사하는 것이 자외선이 해양생태계의 1차 생산성에 미치는 영향을 타진하는데 보다 합리적인 접근 방식인 것으로 사료된다.

4. 해조류에 미치는 자외선의 폐해

중파자외선은 식물의 광합성을 억제하고 광합성 색소를 파괴하며 생장을 억제시키는 등 직·간접적으로 많은 부정적인 영향을 끼치는 것으로 보고된 바 있다. 자외선에 의한 광합성 저해현상은 제2광계의 반응중심에 있는 D1 그리고 D2 폴리펩티드의 붕괴에 기인하는 것으로 알려져 있는데 갈조류인 *Macrocystis pyrifera*에서는 자외선에 의하여 주광수확 복합체에서 제2광계로의 에너지 전달 효율성이 떨어지게 됨에 따라 광합성률이 저하된다고 보고된 바 있다(Clendennen *et al.* 1996; Jansen *et al.* 1996). 광합성 색소의 파괴정도는 자외선 피해의 지표로 사용될 때가 많은데 실험실 배양연구에

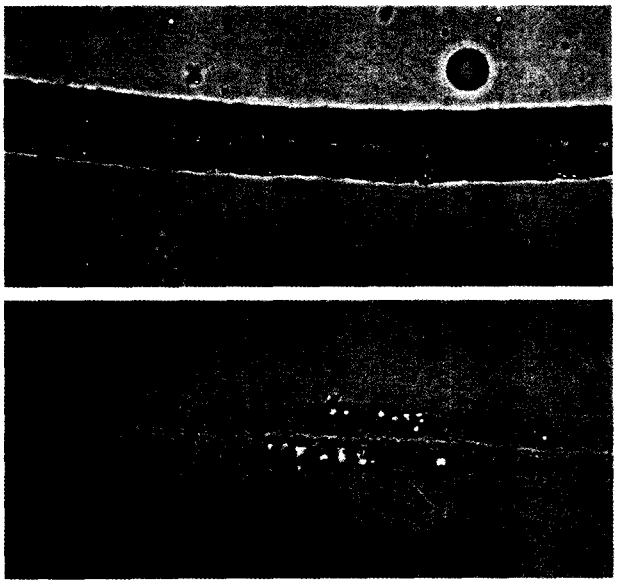

Fig. 3. A photomicrograph of cross sectional view of *Ulva pertusa* thallus. Above: normal thallus; Below: UV-irradiated thallus (Han, unpublished).

따르면, 현재 지표상에 도달되는 양만큼의 인공 중파자외선에 2시간 가량 노출된 녹조 구멍갈파래 식물(*Ulva pertusa*)의 광합성 색소가 50% 이상 소실되는 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 3). 자외선 조사 후 엽록소 농도가 감소되는 현상은 그것이 엽록소의 생합성 과정에 이상이 생겨서 나타나는 현상인지 아니면 색소 자체 혹은 색소 선구물질이 파괴된 결과인지 아직까지 확실하게 규명할 수 없으나, 고등식물에서는 최근 연구결과 자외선이 엽록소 단백질 형성에 필수적인 유전자 발현과정에 영향을 끼침으로써 결과적으로 엽록소 파괴를 유도한다고 한다(Mackerness *et al.* 1996). 자외선은 또한 해조류의 생장에도 막대한 지장을 초래한다. Han (1996)은 최근 한국산 녹조 구멍갈파래의 생장이 자외선 조사량에 비례하여 감소되는 것을 관찰한 바 있고, Grobe와 Murphy (1994)는 자외선 조사된 갈파래 식물의 세포분열이 억제된다고 보고하였는데, 중파자외선은 일반적으로 세포주기에서 G1과 G2시기의 진행을 지연시키는 것으로 알려져 있다(Vant' Hoff 1974). 자외선에 대한 반응은 서식처와 연령에 따라서 종별 그리고 개체별로 차이를 보이는데 수심이 얕은 곳에 서식하는 종 혹은 그곳에 적응된 개체 그리고 연령이 커질수록 자외선에 대한 내성이 높은 경향성을 보인다. 한 예로, 북대서양 조간대에 주로 서식하는 *Laminaria digitata*는 조하대 우점종인 *L. hyperborea*에 비하여 자외선을 함유한 태양광선에 대한 내성이 약 20배 정도 높았고, 같은 *L. hyper-*

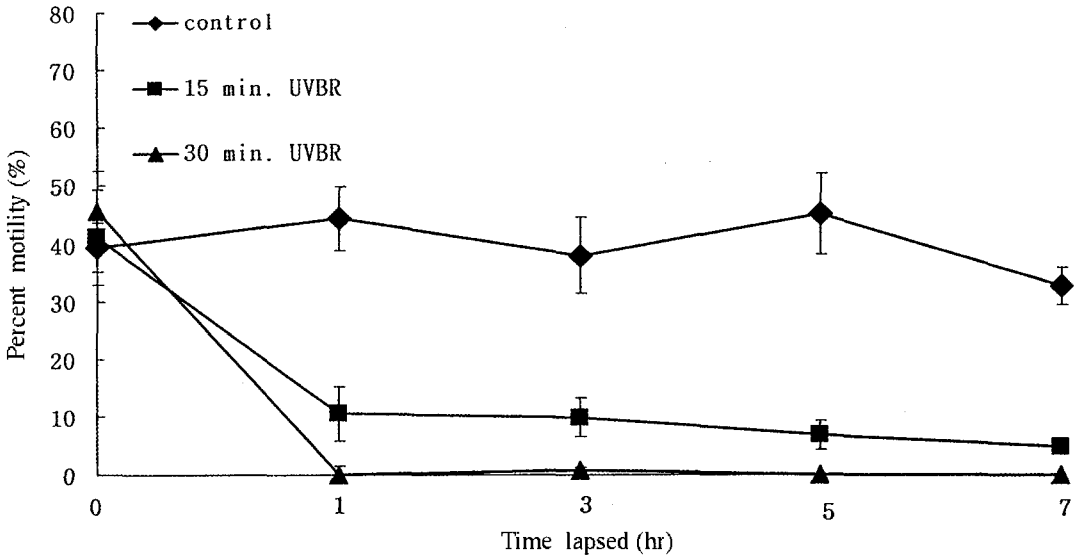

Fig. 4. Time course of change in gamete motility of *Ulva pertusa*. UV-B irradiance used was 2.0 Wm^{-2}. Mean ±95% confidence interval are shown (n=5, 100~200 ind./rep., Park & Han, unpublished).

*borea*에서도 수심 낮은 곳에 적응된 개체가 깊은 곳에 서식하는 개체에 비하여 태양광선에 견디는 능력이 큰 것으로 보고되었다(Han 1992; Han & Kain 1996). 아울러, 유럽산 다시마목 세 종 식물을 대상으로 자외선 민감도를 조사한 결과 연령이 증가할수록 내성이 증가하는 것으로 나타났다(Dring *et al.* 1996). 해조류 중에는 생식세포 단계에서, 그리고 세포내 엽록체 배열과정에서 다양한 운동성을 보이는 것이 있는데 이러한 것은 일종의 생존전략으로 파악되고 있다. 생식세포의 경우, 운동성은 종의 분산 및 높은 생식률을 보장하기 위한 적응기작으로 이해되고 엽록체의 운동은 광합성과 관련하여 광흡수력을 최적화하는 기작으로 추측된다. 한국산 녹조 구멍갈파래에서 생식세포는 자외선 조사시 운동성을 상실하고 부유하게 되는 현상을 나타내는데(Fig. 4; Park & Han 1998), 이로 인하여 생식과정에 문제가 발생할 뿐만 아니라, 서식처 확대에도 지장을 초래할 수 있다. 또한 자연상태에서 이러한 일이 발생할 경우 운동성을 잃은 생식세포들이 해수의 유동에 의하여 육지 쪽으로 밀려가 버리거나, 수면위로 상승하여 더 많은 양의 자외선에 노출됨에 따라 개체군이 사멸되는 경우까지 예측할 수 있다. 구멍갈파래의 엽록체는 낮 시간에 세포면을 덮는 형태를 취하여 광흡수를 극대화하는 반면 밤이 되면 세포벽 주위에 몰리거나 바닥으로 가라앉는 배열방식을 주기적으로 반복하는데 자외선에 노출되면 이러한 주기적 배열능력을 상실하고 세포질의 중앙에 정지된 채로 뭉쳐 있는 모양을 보인다(Kong & Han 1998). 이는 단순히 배열움직임만 정체된 것이든지 혹은 엽록체 자체의 구조적 이상에 연유하든지 궁극적으로 광생리활동에 심각한 부차적 문제를 일으킬 수 있다.

자외선의 영향으로 해조류가 정착에 실패하고 생육에 폐해를 입게 되면 종이 성공적으로 생육할 수 없게 되고 따라서 그 종은 존폐위기에 처하게 될 것인데, 그렇게되면 결국 그 해조류를 직접적으로 섭식하거나, 또는 서식처로 삼고 있는 소비자 생물들도 연계적으로 자취를 감추게 되는 결과를 초래할 것이다. 이는 군집내 변화와 함께 종의 소실로 인한 종다양성의 감소로 이어져 생태계의 안정성을 감소시키고, 수산업의 부진을 야기하는 등 천파만파의 연쇄적인 효과를 일으킬 가능성이 매우 높다. 그러나, 실험실내에서 수행된 연구결과를 가지고 야외 자연상태에서 일어나는 현상을 직접적으로 설명하기에는 여러 가지 측면에서 한계가 있다. 예를 들어, 실험실에서 생리현상을 관찰하기 위하여 사용하는 광원의 광량, 스펙트럼 그리고 UV-B/UV-A/PAR의 비율 등이 자연광과 완전히 동일할 수는 없다. 뿐만 아니라, 자연상태에서는 자외선 외에도 온도, 염분도, 건조, 영양염류 등의 다른 환경요인이 복합적으로 작용하는 까닭에 자외선의 효과가 어떤 방향으로 변화될 지 아무도 예측할 수가 없다.

5. 자외선에 대한 방어 및 적응기작

지금까지 연구된 바로는 자외선에 대한 내성 및 적응성을 높여 주는 기작으로 자외선 상해를 받은 DNA 복구의 효율성과 자외선 흡수물질의 형성 등이 있는데, 우

선적으로 다세포성 해조류에서는 유럽산 다시마목 3종 식물이 가시광선 처리에 의하여 자외선 상해로부터 완화되는 현상이 밝혀진 바 있다(Han & Kain 1992, 1993). 광재활성화(photoreactivation)라고 불리는 이 과정은 자외선 광자의 흡수로 이합체(dimer)가 형성된 DNA 부위에 광분해효소(photolyases)가 결합하여 가시광선을 이용하여 단위체화(monomerization)하는 기작으로 설명된 바 있다(Cadet *et al.* 1992).

반면, 자외선을 강하게 차단하는 색소가 존재한다는 사실이 여러 생물에서 이미 오래 전에 보고된 바 있다(Sivalingam *et al.* 1974; Dunlap & Chalker 1986; Dunlap *et al.* 1989; Carreto *et al.* 1990). 해조류에서도 약 334~340 nm 즉, UV-A 영역의 파장을 흡수하는 마이코스포린 유사 아미노산(Mycosporine-like Amino Acids; MAAs)이 추출된 바 있는데(Shin & Kim 1997), 지금까지 palythine, shinorine, mycosporine-glycine, palythene, asterina-330 그리고 palythinol 등의 MAA가 밝혀졌다. 이러한 자외선 흡수물질은 인간의 피부에서 나타나는 melanin 색소와 유사한 기능을 하는 것으로 추측되는데 즉, 자외선이 핵, 엽록체, 세포내 다른 소기관에 도달되는 것을 방어해주는 기능을 하는 것으로 추정되고 있다. 한국산 녹조류인 구멍갈파래(*Ulva pertusa*)와 홍조류인 도박류(*Pachymeniopsis* sp.)에서도 각각 280 nm와 320 nm 즉, UV-B 영역에서 강한 흡수를 보이는 물질이 존재한다는 것이 최근 확인되었다(Fig. 5). 이는 현재 문제가되는 중파자외선을 흡수한다는 점에서 매우 의미 있는 발견으로 만약 이 물질이 실제로 자외선 차단효과를 통하여 이 물질을 함유한 해조류의 자외선 내성을 높혀 준다는 것이 확인될 경우, 신소재 물질로서의 개발까지도 충분히 고려해 볼 가치가 있는 것으로 사료된다.

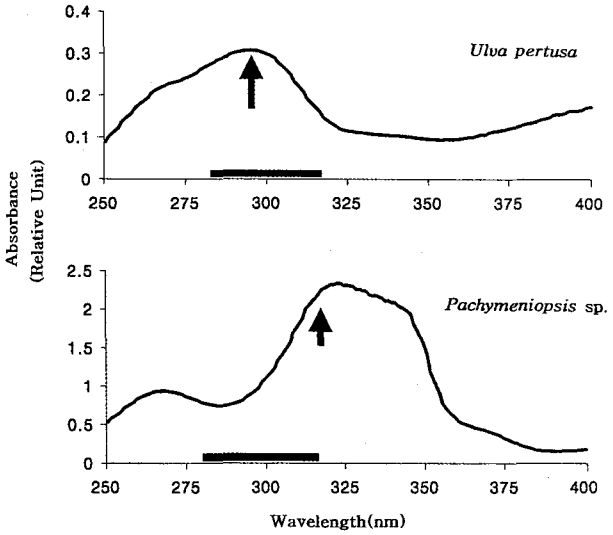

Fig. 5. Amounts of UV-absorbing substances estimated from spectrophotometric scan of methanol extracts (80%) in two species of Korean macrophytes (Han, unpublished).

결 론

종합적인 관점에서 볼 때, 자외선이 해양생태계에 미치는 유해작용으로는 생물량 감소 및 먹이망의 교란, 생태계내의 종조성 변화 그리고 대기내 CO_2 증가로 인한 기후 변화 등을 들 수 있다. 앞서 지적된 바 있듯이 자외선이 1차 생산자에 심각한 피해를 입힌다면 생태계의 특성상, 우선적으로 각 영양단계에서의 생산성 및 생물체량이 감소될 것이고, 이렇게되면 연쇄적으로 얽혀서 조화를 이루고 있는 먹이망이 교란되므로 생태계의 구조적 안정성이 위협받게 되는 지경에 이를 것으로 사료된다. 또한, 자외선에 의한 직접적인 피해와 먹이망 결손의 복합적인 효과로 인하여 생태계를 구축하는 종 조성이 변화되고 종의 소실 및 감소화 현상이 뚜렷해짐으로써 외부환경요인에 대한 생태계의 탄력성이 약화되는 결과를 초래할 것으로 보인다. 이러한 결과들은 결국 어업과 수산업에서 수확량의 막대한 감소와 직결된다.

대기중의 이산화탄소(CO_2)는 자연 순환이 이루어져서, 약 200 Gt의 탄소가 육상 및 해양식물의 유기물 합성에 이용되므로써 식물체내에 고정되는 반면, 유기물의 분해로 인하여 같은 양의 탄소가 대기로 유입된다. 그러나, 산림파괴와 화석연료의 연소과정에서 발생하는 탄소로 인하여 대기중 이산화탄소의 순환균형이 깨지면서 소위 말하는 온실효과의 발생과 지구온난화현상이 나타나게 되었다. 해양생태계내의 1차 생산자들은 육상식물과 마찬가지로 지구상에서 매우 중요한 탄소저장고라고 할 수 있는데, 만약 자외선 증가로 인하여 해조류 및 식물플랑크톤들이 탄소를 고정하는 능력을 상실하거나, 탄소를 고정할 식물들이 수적으로 감소된다면 탄소의 대기유입이 증가되어 지구온난화는 상상할 수 없을 정도로 가속화될 것이고, 이러한 온도상승효과는 역으로 대기온도의 완충역할을 감당하는 해수의 물리적인 성격을 변화시켜서 해양생태계내의 생물에 폐해를 끼치는 악순환을 야기할 것이다. 현재와 같은 추세라면 2080년이 되었을 때 대기중의 이산화탄소량이 현재의 2배 가량 될 것이고, 기온은 1.5~4.5°C 상승되어서 그 결과로 해수면이 1 m 가량 높아질 것으로 예측된다(Weaver 1993).

해양 1차생산자는 또한 dimethylsulfide (DMS)와 같은 유기황화합물(organic sulfide compounds)을 대기 중

에 방출하기도 하는데, 이는 구름의 결빙핵으로 이용된다. 자외선 폐해로 해조류 및 식물플랑크톤에 의한 DMS의 생산이 감소될 경우, 대기내 광선투과율이 높아져 자외선의 양적 증가현상이 동반될 수 있다(Bates *et al.* 1987; Charlston *et al.* 1987). 실제로 구름은 지표상의 자외선량을 조절하는데 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있고, 짙은 구름이 낄 경우, 맑은 날에 비하여 자외선량이 20~50% 정도 감소되는 것을 자주 관찰할 수 있다(저자의 미발표자료).

제 언

해양생태계는 주변자외선의 양적 변화에 대하여 갑작스런 구조적 붕괴를 보인다던가 생산성 감소현상을 나타내지 않고 어느 정도 탄력적인 저항성을 견지할 것으로 예측된다. 그러나, 자외선의 지속적인 증가현상이 가져올 궁극적인 폐해효과에 대해서는 규모나 내용 면에서 모두 미지수인 까닭에 이에 대처하기 위해서는 생물지표종(bioindicator species)을 개발·이용하고 생태계 내의 군집구조를 장기적으로 모니터링함으로써 자외선 증가에 따른 해양생태계의 변화양상을 추적해 가는 작업이 필요하다고 본다. 특히, 해양생태계에 미치는 자외선의 생물학적 영향을 정량적으로 평가하기 위해서는 모델링의 확립이 필요한데, 여기에는 다음의 네 가지 요인을 포함시켜야 할 것이다.

① 오존량과 자외선량의 지속적 측정
② 해수내 수심에 따른 파장별 투과도 측정
③ 해조류의 수직분포 관찰 및 정량분석
④ 해조류의 자외선 민감도 및 적응성 혹은 저항성 분석

위에서 제시한 요인들을 살펴보면, 자외선 영향 평가를 위해서 여러 분야간의 정보교환 및 협동연구가 필요불가결함을 알 수 있다. 한 예로, 오존량과 자외선량을 측정하고 예측 과정에는 오존의 두께, 태양정점각도, 공기중 물질농도 그리고 표면 albedo와 같은 대기기상물리학적 요인들에 대한 면밀한 분석이 필요하다. 이와 같은 대기 모델링 작업은 다시 수중 생물광학적 모델링 작업을 위한 입력인자(input)가 될 수 있고, 식물의 수직분포와 자외선 투과성 사이의 관계성을 확립하는 작업에 이용될 것이다. 여기에 실험실 혹은 야외에서 조사된 각 해조류의 자외선에 대한 민감성 혹은 적응성 반응의 자료들을 병합함으로써 해양생태계 1차 생산자에 미치는 자외선의 영향을 평가하고 예측하는 하나의 생물학적 예보시스템이 비로소 구체화 될 수 있을 것이다. 아울러 자외선 환경변화에 대한 능동적인 대책으로 자외선내성이 큰 식물을 찾아내어 생태계의 1차 생산자 위치에 인위적으로 접목시킴으로써 생태계의 기반구조를 안정화시키는데 기여할 수 있고, 자외선 폐해로부터의 회복 반응에 주안하여 양식시 이러한 처리기법을 이용할 수도 있을 것으로 판단된다. 실용적인 면에서 해조류에서 발견되는 자외선 흡수물질을 추출하여 정제가공해서 사용하거나 실험실내에서 흡수물질을 대량으로 생산해 내는 시스템을 개발하므로써 산업화를 이루는데 이용될 수도 있을 것이라고 사료된다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초 연구(96-0401-09-01-3)의 연구비 일부 지원에 의하여 수행되었습니다. 초고 교정시 많은 조언을 아끼지 않으신 충남대 부성민 교수님과 익명의 편집위원님께 깊이 감사드립니다. 워드 작업을 도와 준 박병직군에게도 고마움을 전합니다.

참 고 문 헌

Bates TS, RJ Charlston & RH Gammond (1987) Evidence for the climatic role of marine sulfur. *Nature* **329** : 319-321.

Cadet J, C Anselmino, T Douki & L Voituriez (1992) Photochemistry of nucleic acids in cells. *J. Photochem. Photobiol. B: Biol.* **15** : 277-298.

Caldwell MM (1981) Plant response to solar ultraviolet radiation. pp. 169-198. *In* Encyclopedia of Plant Physiology, Vol. 12A, Physiological Plant Ecology 1. Response to the Physical Environment (Lange OL, PS Nobel, CB Osmond & H Zeigler *eds*). Springer-Verlag, Berlin.

Calkins J & T Thordardottir (1980) The ecological significance of solar UV radiation on aquatic organisms. *Nature* **283** : 563-566.

Carreto JI, MO Carignam, G Daleo & SG DeMarco (1990) Occurrence of mycosporine-like amino acids in the red tide dinoflagellate *Alexandrium excavatum*: UV-protective compounds. *J. Plankton Res.* **12** : 909-921.

Charlston RL, JE Lovelock, MO Andreae & SG Warren (1987) Oceanic phytoplankton, atmospheric sulfur cloud albedo and climate. *Nature* **326** : 655-661.

Clendennen SK, RC Zimmerman, DA Powers & RS Albert (1996) Photosynthetic response of the giant kelp *Macrocystis pyrifera* (Phaeophyceae) to ultraviolet radiation. *J. Phycol.* **32** : 614-620.

Dring MJ, V Marakov, E Schoschina, M Lorenz & K Lüning (1996) Influence of ultraviolet radiation on chlorophyll fluorescence and growth in different life history stages of three species of *Laminaria* (Phaeophyta). *Mar. Biol.* **126** : 183-191.

Dunlap WC & BE Chalker (1986) Identification and quantification of near-UV absorbing compounds (S-320) in a hermatypic Scleractinian. *Coral Reefs* **5** : 1-5.

Dunlap WC, DM Williams, BE Chalker & A Banszak (1989) Biochemical photoadaptation in vision: UV-absorbing pigments in fish eye tissues. *Com. Biochem. Physiol. B. Comp. Biochem.* **93** : 601-607.

Grobe CW & TM Murphy (1994) Inhibition of growth of *Ulva* expansa (Chlorophyta) by ultraviolt-B radiation. *J. Phycol.* **30** : 783-790.

Häder DP & RC Worrest (1991) Effects of enhanced solar ultraviolet radiation on aquatic ecosystems. *Photochem. Photobiol.* **53** : 717-725.

Han T (1992) Effect of visible and UV radiation on early sporophytes of species of the Laminariales. Ph.D. Thesis, University of Liverpool.

Han T & JM Kain (1992) Blue light sensitivity of UV-irradiated young sporophytes of *Laminaria hyperborea*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **158** : 219-230.

Han T & JM Kain (1993) Blue light photoreactivation in UV-irradiated young sporophytes of *Alaria esculenta* and *Laminaria saccharina* (Phaeophyta). *J. Phycol.* **29** : 79-81.

Han T (1996) Effect of UV-B radiation on *Ulva pertusa* Kjellman (Chlorophyta) I. Growth and pigmentation. *Algae* **11** : 155-159.

Han T & JM Kain (1996) Effect of photon irradiance and photoperiod on young sporophytes of four species of the Laminariales. *Eur. J. Phycol.* **31** : 233-240.

Jansen MAK, BM Greenberg, M Edelman, AK Matoo & V Gaba (1996) Accelerated degradation of the D2 protein of photosystem II under UV-B radiation. *Photochem. Photobiol.* **63** : 814-817.

Jerlov NG (1950) Ultraviolet radiation in the sea. *Nature* **166** : 111-112.

Jerlov NG (1976) Marine Optics. Elsevier, Amsterdam.

Kirk JTO (1994) Light and Photosynthesis in the Aquatic Environment. Cambridge University Press, Cambridge.

Kong JA & T Han (1998) Rhythmic phenomena in a green alga *Ulva pertusa* exposed to different light qualities. *The Phycologist* **49** : 38.

Kramer GF, HA Norman, DT Krizek & RM Mirecki (1991) Influence of UV-B radiation on polyamines, lipid peroxidation and membrane lipids in cucumber. *Phytochemistry* **30** : 2101-2108.

MacIntyre F (1974) The top milimeter of the ocean. *Scient. Amer.* **230** : 62-77.

Mann KH (1972) Macrophyte production and detritus food chains in coastal waters. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* **29** : 353-383.

Mann KH & ARO Chapman (1975) Primary production of marine macrophytes. pp. 207-223. *In* Photosynthesis and Productivity in Different Environments (Cooper JP *ed*). Cambridge University Press, Cambridge.

Marckerness SAH, JP Butt, BR Jordan & B Thomas (1996) Ameriolation of ultraviolet-B-induced down-regulation of m-RNA levels for chloroplast proteins, by high irradiance, is mediated by photosynthesis. *J. Plant Physiol.* **148** : 100-106.

Mitchell DL & D Karentz (1993) The induction and repair of DNA photodamge in the environment. pp. 345-377. *In* Environmental UV Photobiology (Young A, LO Björn, J Moan & W Nultsch *eds*). Plenum Press, London.

Park BJ & T Han (1998) Effect of UVB radiation on gamete motility of *Ulva pertusa* (Chlorophyta). *The Phycologist* **49** : 40.

Preisendorfer RW (1976) Hydrological Optics (6 volumes). U.S. Dept. of Comm., NOAA, Honolulu, HA.

Rowland FS (1982) Possible anthropogenic influences on stratospheric ozone. pp. 29-48. *In* The Role of Solar Ultraviolet Radiation in Marine Ecosystems (Calkins J *ed*). Plenum, New York.

Shin HW & GH Kim (1997) Characterization of UV-absorbing compounds in Korean macrophytes, *Ulva pertusa* Kjellman (Chlorophyta), *Hizikia fusiformis* (Harvey) Okamura (Phaeophyta), and *Pterocladia capillacea* (Gmelin) Bornet et Thuret (Rhodophyta). *Algae* **12** : 17-21.

Siegenthaler U & JL Sarmiento (1993) Atmospheric carbon dioxide and the ocean. *Nature* **365** : 119-125.

Sivalingam PM, T Ikawa, Y Yokohama & K Nisizawa (1974) Distribution of a 334 UV-absorbing substance in algae, with special regard of its possible physiological roles. *Bot. Mar.* **17** : 23-29.

Smith RC, BB Prezelin, KS Baker, RR Bidigare, NP Boucher, T Coley, D Karentz, S MacIntyre, HA Matlick, D Menzies, M Ondrusek, Z Wan & KJ Waters (1992) Ozone depletion : ultraviolet radiation and phytoplankton biology in Antarctic waters. *Science* **255** : 952-959.

Vant't Hoff J (1974) Regulation of cell division in higher plants. *Brookhaven Symp. Biol.* **25** : 152-165.

Weaver AJ (1993) The oceans and global warming. *Nature* **364** : 192-193.

Yu SG & LO Björn (1997) Overview of effects of enhanced solar ultra-violet radiation on aquatic ecosystems. *J. Photochem. Photobiol. B. Biol.* **37** : 212-218.

Overview of UV-B Effects on Marine Algae

Taejun Han

(Department of Biology, University of Inchon, Inchon 402-749, Korea)

Abstract - Numerous observations revealed strong evidence of increased middle ultraviolet radiation or UV-B (280~320 nm) at the earth's surface resulting from stratospheric ozone depletion. UV is the waveband of electromagnetic radiation which is strongly absorbed by nucleic acids and proteins, thus causing damage to living systems. It has been recorded in the East Sea, Korea that solar UV-B impinging on the ocean surface penetrates seawater to significant depths. Recent researches showed that exposure to UV-B for as short as 2h at the ambient level (2.0 Wm^{-2}) decreased macroalgal growth and photosynthesis and destroyed photosynthetic pigments. These may suggest that UV-B could be an important environmental factor to determine algal survival and distribution. Some adaptive mechanisms to protect macroalgae from UV damage have been found, which include photoreactivation and formation of UV-absorbing pigments. Post-illumination of visible light mitigated UV-induced damage in laminarian young sporophytes with blue the most effective waveband. The existence of UV-B absorbing pigments has been recognized in the green alga, *Ulva pertusa* and the red alga, *Pachymeniopsis* sp., which is likely to exert protective function for photosynthetic pigments inside the thalli from UV-damage. Further studies are however needed to confirm that these mechanisms are of general occurrence in seaweeds. Macroalgae together with phytoplankton are the primary producers to incorporate about 100 Gt of carbons per year, and provide half of the total biomass on the earth. UV-driven reduction in macroalgal biomass, if any, would therefore cause deleterious effects on marine ecosystem. The ultimate impacts of increasing UV-B flux due to ozone destruction are still unknown, but the impression from UV studies made so far seems to highlight the importance of setting up long-term monitoring system for us to be able to predict and detect the onset of large-scale deterioralion in aquatic ecosystem. [UV-B, ozone depletion, photoreactivation, UV-absorbing pigments, marine macroalgae, marine ecosystem].