한국환경생태학회지 31(6): 529−536, 2017
Korean J. Environ. Ecol. 31(6): 529-536, December 2017
ISSN 1229-3857(Print) ISSN 2288-131X(Online)
https://doi.org/10.13047/KJEE.2017.31.6.529

제주연안에서 기후변화가 갯녹음 확산에 미치는 영향[1a]

황성일[2] · 김대권[2*] · 성봉준[2] · 전수경[2] · 배종일[2] · 전병현[2]

Effects of Climate Change on Whitening Event Proliferation the Coast of Jeju[1a]

Sung-Il HWANG[2], Dae-Kweon KIM[2*], Bong-Jun SUNG[2], Sue-Kyung JUN[2], Jong-Il BAE[2], Byeong-Hyeon JEON[2]

요 약

이 연구는 제주연안 해역에서 갯녹음의 확산동향과 기후변화로 인한 동계 수온변화(수온상승)가 갯녹음 확산에 미치는 영향을 알아보고 갯녹음 원인생물인 무절석회조류의 번식과 생장을 파악하기 위해 연구되었다. 제주연안의 갯녹음 발생면적은 1998년에는 2,931ha였으나, 2003년에는 4,541ha로 증가하였다. 발생해역도 1998년은 제주도 남부 해역에서 주로 발생했으나, 2003년에는 조천읍, 구좌읍을 제외한 제주도 전역으로 확산되었다. 1992년부터 2004년까지 관측된 2월 평균수온은 갯녹음 해역 15.1℃, 해중림 해역 13.9℃로 갯녹음 해역이 1.2℃가 높게 나타나 두 해역 간 뚜렷한 차이를 보였으나, 8월 수온은 두 해역 간 차이가 없었다. 수온의 장기변동(37년)에서도 갯녹음 해역이 평균 15.3℃인데 비하여 해중림 해역은 평균 14.1℃로 갯녹음 해역이 해중림 해역보다 1.2℃가 높게 나타났다. 연간 수온 증가 값은 갯녹음 해역이 매년 0.038℃씩 증가하고 있는 반면, 해중림 해역은 0.024℃씩 증가하여 장기 수온변동은 갯녹음 해역이 해중림 해역보다 높았다. 이와 같이 기후변화로 인한 지속적인 동계 수온상승은 제주도 갯녹음을 확대시키고 있음을 시사하고 있다.

주요어: 제주도, 수온, 해중림

ABSTRACT

The study is intended to investigate the proliferation of whitening, the impact of climate change (sea temperature rise) on the proliferation of whitening, and the reproduction and growth of crustose coralline algae, which causes the whitening, in the coast of Jeju Island. The size of the whitening-affected area in the coast of Jeju was 2,931ha in 1998 and increased to 4,541ha in 2003. The whitening occurred mainly in the southern coast of Jeju in 1998 but spread across the whole coast of Jeju by 2003, except in the coast of Jocheon-eup (eup refers to an administrative district in Korea) and Gujwa-eup. The average sea water temperature in February from 1992 to 2004 was 15.1℃ in the whitening affected area and 13.9℃ in the marine forest area, showing a clear difference, but there was no difference in the average temperature in August. The long-term (37-year period) average of the sea temperature was 15.3℃ in the whitening affected area and 14.1℃ in the marine forest area, showing 1.2℃ higher in the whitening area. The annual rate of sea temperature rise was 0.038℃ in the whitening area and 0.024℃ in the marine forest area, indicating the higher long-term variation of sea temperature in the water affected by whitening. The results indicate that the continuous increase in winter water temperature due to climate change is expanding

1 접수 2017년 7월 25일, 수정 (1차: 2017년 11월 28일), 게재확정 2017년 11월 29일
Received 25 July 2017; Revised (1st: 28 November 2017); Accepted 29 November 2017

2 ㈜ 수중생태기술연구소 Underwater Ecology Institude Yeosu-si 59769, Korea

a 이 연구는 국립수산과학원 제주수산연구소의 「해중림 조성사업」, 한국수산자원관리공단의 「전국연안 갯녹음 실태조사」 사업의 일환으로 수행되었음

* 교신저자 Corresponding author: Tel: +82-61-644-7605, Fax: +82-61-644-7609, E-mail: daikweon@hanmail.net

proliferation of whitening in the Jeju island.
KEY WORDS: JEJU ISLAND, WATER TEMPERATURE, MARINE FOREST

서 론

2007년에 발간된 IPCC 제4차 보고서에 따르면 21세기에는 기후변화가 가속화되어 해수 평균수온이 6.4℃해수면은 최대 59cm가 상승할 것으로 예측하고 있으며 우리나라 주변해역은 지난 1968년부터 2008년까지 41년 동안 동해 0.034℃, 남해 0.031℃, 서해 0.030℃가 상승한 것으로 보고되고 있다(Seong *et al*., 2010).

기후변화의 대표적인 현상인 수온상승은 해조류의 생장에 영향을 미치며 해조류가 소실되는 갯녹음 현상이 원인으로 주목받고 있다(Fujita, 2010). 갯녹음이란 일반적으로 연안에 서식하는 엽상바닷말이 소실되고 무절석회조류(Crustose coralline algae)가 암반 표면을 광범위하게 피복하면서 암반에 서식하던 해양생물의 종다양성과 생체량이 급격히 감소하여 바다 암반이 황폐화되는 현상이다.

최근 한국수산자원관리공단(FIRA; Korea Fisheries Resour Agency)에서 초분광항공영상을 이용하여 우리나라 동해, 남해, 제주 해역을 대상으로 갯녹음 실태조사를 실시한 결과에 따르면 전체 조사면적 40,868ha 중 18,759ha에서 갯녹음이 진행중이거나 심화된 것으로 조사되어 연안어장 45.9%가 갯녹음이 발생하였다. 대형 해조들이 군락을 형성하는 해중림은 연안 생태계에서 중요한 일차 생산자로서 물질순환의 중심을 이루고 있을 뿐만 아니라, 어류 또는 무척추동물을 포함한 다양한 생물의 서식공간으로서 군집의 이차생산력을 높이는 역할을 한다. 그러나 최근, 제주 연안은 급속하게 해중림이 파괴되고 있다(Kim, 2002).

갯녹음의 확산은 조식성 동물에게는 먹이장 파괴로 인해 먹이를 찾아 이동하거나 굶어 죽게 되고, 해조군집을 서식장으로 이용하는 모든 생물은 서식장과 산란장 파괴로 인해 삶의 터전을 잃게 된다. 이 보다 더 큰 문제는 해양생태계의 균형이 유지될 수 없다는 점이다. 따라서 갯녹음 확산에 대처하기 위해서는 무엇보다 먼저 갯녹음을 일으키고 지속시키는 원인을 명확히 밝혀야 할 것이며, 그 다음으로 파괴된 갯녹음 해역을 어떻게 효율적으로 복원할 것인가에 대한 대안이 제시되어야 할 것이다.

제주도에서 갯녹음에 대한 연구는 국립수산과학원 제주수산연구소에 의해 처음으로 시도되었다. 이 조사에서 제주도의 갯녹음 발생원인은 성게류의 과도한 식해를 지적하였고, 이어 Chung *et al.*(1998)은 해수교환 불량과 육지근원의 오염원 유입 가능성을 시사한 바 있다.

또한 Lee *et al.*(1998)은 대형 갈조류와 무절산호조류 군집이 서로 확대와 축소를 반복하는 천이의 한 과정으로 설명하기도 하였다. 이후 Kim *et al.*(2002)은 제주연안의 갯녹음은 소라(*Batillus cornutus*), 바퀴고둥(*Astralium haematragum*) 등 조식성 패류들이 제주도 갯녹음을 확대, 지속시키고 있다고 하였으며 Kim *et al.*(2004)은 독도에서도 갯녹음을 확인하였다.

제주연안의 갯녹음 원인은 연구자들의 접근방법에 따라 견해가 다를 수 있다. 그러나 지금까지의 연구한 결과들을 종합해 볼 때 해역에 따라서는 조식성동물의 과도섭식에 기인하는 곳도 있지만, 광역적으로는 기후변화에 의한 수온상승이 제주도 갯녹음 해역을 확대시키고 있는 것으로 보인다.

이 연구는 제주도 연안에서 갯녹음 발생실태와 확산동향을 파악하고 동계(2월) 수온변화가 갯녹음 발생과 확산에 어떻게 영향을 미치는 지를 알아보기 위해 제주도 갯녹음 해역과 해중림 해역의 장·단기 수온변동을 조사하였고 또한 갯녹음 원인생물인 무절산호조류가 어떻게 확산되는가에 대하여도 조사하였다.

연구방법

1. 갯녹음 발생실태 조사

제주연안에서 갯녹음의 시, 공간적 변동양상을 파악하기 위해 1998년 2월부터 12월까지, 그리고 2003년 8월부터 9월까지 총 37개 정점(1998년 조사 23개, 2003년 조사 16개, 9개 정점 중복)을 조사하였다(Figure 1).

갯녹음의 진행단계는 산호조류의 피도와 산호조류 외의 해조류 분포상태를 기준으로 갯녹음을 4단계(1: 정상, 2: 초기, 3: 중기, 4: 말기)의 categorical values로 나타내었다.

정상 해역은 대형 갈조류가 숲을 형성하는 곳, 초기는 산호조류 피도가 30% 이하인 해역, 중기는 산호조류 피도가 31-80%인 곳, 말기는 산호조류 피도가 81% 이상인 해역이다.

갯녹음 발생현황은 총 37개 정점에 대한 categorical value를 이용하여 2차원 contour로 나타내었다. 정상은 categorical value가 1이므로 파란색, 초기는 2이므로 노란색, 중기는 3이므로 핑크색, 말기는 4이므로 빨간색 등으로 표현하였다.

제주연안에서 갯녹음 발생해역이 해역 간 차이는 1998년

과 2003년 조사된 정점의 위치가 서로 달라 정점별 비교가 어려웠기 때문에 37개 조사정점을 4개의 행정구역(제주시, 북제주군, 남제주군, 서귀포시)으로 묶어, one-way ANOVA를 이용하여 행정구역별로 비교하였다.

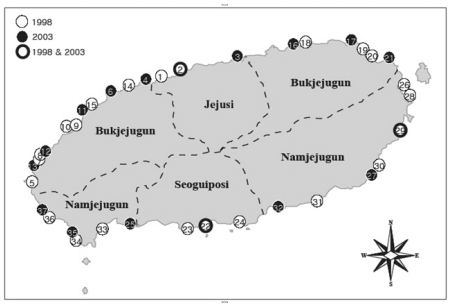

Figure 1. Map showing the 37 sites investigated for the barren ground survey along the coast of Jeju in 1998 (●) and 2003 (○).

2. 수온변동

제주연안의 갯녹음 발생원인을 파악하기 위해 동계인 2월과 하계인 8월에 갯녹음 발생해역과 해중림 해역의 수온이 어떻게 다른가를 비교하였다.

갯녹음 발생해역으로는 제주연안에서 갯녹음이 가장 심한 서귀포시 법환동 해역(33° 13′ 58″ N, 126° 30′ 51″ E)을 선택하였고, 해중림 해역은 해중림이 잘 발달된 한림읍 비양도 해역(33° 24′ 24″ N, 126° 13′ 55″ E)을 선택하였다.

수온은 장·단기 변동으로 나누어 조사하였다. 단기변동은 1992년부터 2005년까지 동계(2월)와 하계(8월) 두 차례에 걸쳐 CTD(SBE 19)로 측정하였다. 장기변동은 1968년부터 2006년까지 관측된 국립수산과학원 정선관측 자료를 이용하였다. 관측위치는 법환동에서 가장 가까운 314-05점(33° 00′ N, 126° 30′ E)과 비양도에 인접한 313-02점(33° 24.4′ N, 126° 00′ E)의 관측 자료를 이용하였다.

3. 무절석회조류의 가입과 생장

천이의 결과로 인해 갯녹음 해역에 최종적으로 남아 있는 무절산호조류는 주변의 대형 갈조류 seed bank로부터 유입되는 포자의 착생을 저해할 수 있다.

많은 연구에서 볼 수 있듯이 빽빽하게 차 있는 해조류 bed는 주변에서 수송된 포자의 착생을 저해하는 barrier 역할을 한다(Vadas *et al*., 1992; Kang, 2005).

또한 Wootton(2002)에 의하면 천이의 일련의 과정은 크게 “the rise to dominance와 the demise of dominance” 두 가지 과정 (process)으로 나뉘며, 어떤 특정종의 “the rise to dominance”는 본질적으로 그 종의 확산능력(dispersal ability)과 주변 해역에서의 상대적 밀도에 의해 지배된다.

갯녹음 해역에서 우점적으로 존재하는 무절산호조류는 “the rise to dominance”에 의해 어느 일정 풍도 (abundance) 만큼 지속적으로 증대되고, 증대된 풍도는 종내 주변에서 수송되는 대형 갈조류의 착생을 억제하는 barrier로써 작용할 수 있다.

따라서 갯녹음 해역과 해중림 해역에서의 무절산호조류의 “the rise to dominance” 과정을 비교하기 위해 1999년 2, 4, 6, 8월에 법환과 비양도 두 해역의 수심 6m에 가로, 세로 각 50cm, 높이 12cm(무게 60kg) 규격의 콘크리트 블럭을 각각 5개씩 시설하였다. 이후 2개월 간격으로 블록을 인양하여 비파괴적인 방법(nondestructive method)인 사진촬영 방법으로 무절산호조류의 피도(bottom cover, %)를 조사하였다. 조사는 1999년 10월까지 실시하였다.

결 과

1. 갯녹음 확산동향

1998년과 2003년의 갯녹음 확산경향은 Figure 2에 나타냈다. 1998년의 경우, 서귀포시와 안덕면, 대정읍 등 3개 정점은 말기 단계를 보였고, 중기단계도 남원읍, 표선면 2개 정점에서 나타나 주로 갯녹음은 제주도 남부에 치우쳐 있음을 알 수 있다.

그러나 2003년에는 1998년도 조사 당시, 말기단계인 안덕면, 대정읍 등 3개 정점은 말기상태를 지속하고 있으며, 제주도 북서부 해역으로 말기와 중기해역이 확대되고 있음을 볼 수 있다.

행정구역별로 갯녹음 진행단계를 4단계(1: 정상, 2: 초기, 3: 중기, 4: 말기)로 구분한 Categorical values 값 또한 서귀포시 해역은 큰 변동이 없으나 제주시와 북제주군 해역은 증가되었음을 보여주고 있다(Figure 3). 지역별 증가율은을 보면 제주시 해역이 32.2%로 가장 많이 증가하였으며 남제주군 해역이 4.9%로 가장 적게 증가하였다(Table 1).

2. 해중림 해역과 갯녹음 해역의 수온 변동

1992년부터 2005년까지 법환과 비양도 해역에서 2월과 8월에 관측된 표층수온은 Figure 4와 같다.

2월 수온은 비양도 해역에서 10.0-15.0℃(평균 13.9℃ ±1.4) 범위를 보였으며, 법환 해역은 13.0-16.4℃(평균 15.1℃±1.1) 범위를 보였다. 두 해역 간 평균 수온은 법환 해역이 비양도 해역보다 1.2℃가 높았으며, 두 해역 간에 뚜렷한 차이를 보였다(P=0.001).

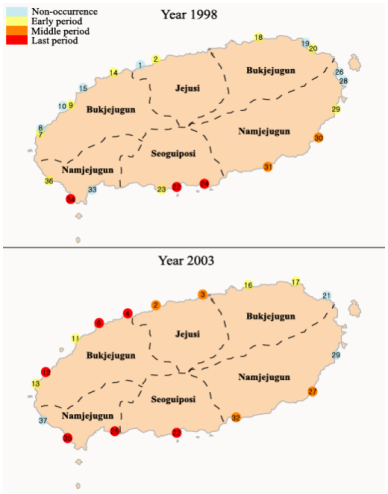

Figure 2, Maps of barren ground along the coast of Jeju. (Upper panel: survey in 1998, Lower panel: survey in 2003)

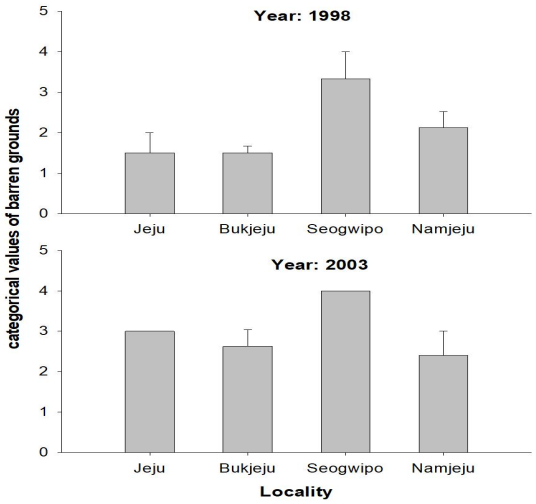

Figure 3. Comparison of barren ground along the coast of Jeju. Data are categorical values of round (1: undisturbed, 2: early stage, 3: middle stage, 4: last stage). Data are mean±standard error

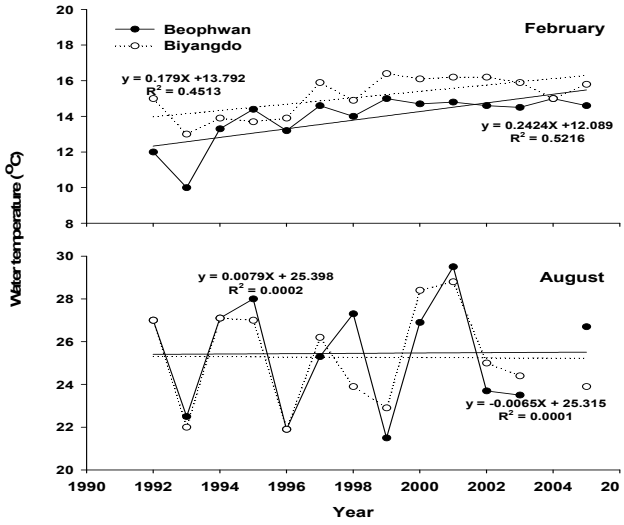

Figure 4. Annual variations in water temperature of the surface layer at Beophwan barren ground) and Biyangdo(undisturbed area)

또한 두 해역 모두 매년 법환 해역에서는 0.18℃, 비양도 해역에서는 매년 0.24℃씩 수온이 상승하고 있어 최근의 수온 증가폭은 비양도 해역이 법환해역 보다 높았다.

하계인 8월의 수온은 법환 해역이 21.9-28.8℃(평균 25.3℃±2.3) 범위였으며, 비양도 해역은 21.5-29.5℃(평균 25.5℃±2.6)로 나타나 두 해역 간 8월 수온은 차이가 없었다(P=0.67, Table 2).

두 해역의 표층과 10m층에서의 동계(2월) 장기 수온변화는 Figure 5와 같다. 표층 수온은 법환 해역이 12.2-18.6℃(평균 15.3℃±1.1) 범위였으며, 비양도 해역은 11.9-15.0℃(평균 14.1℃±0.8) 범위로 평균 수온은 법환 해역이 비양도 해역에 비해 1.2℃가 높았다. 장기변화 또한 두 해역 간 뚜렷한 차이를 보였다(P=0.001). 연 평균 수온상승은 법환 해역이 0.038℃, 비양도 해역이 0.023℃씩 증가하고 있다.

반면, 기온의 영향을 적게 받는 10m 수층에서는 법환 해역 13.7-16.7℃(평균 15.3℃±0.8), 비양도 해역 12.5-15.3℃(평균 14.2℃±0.8) 범위로 법환 해역이 비양도 해역보다 평균 1.2℃가 높게 나타나고 있고, 두 해역 간에 뚜렷한 수온 차이를 보였다(P=0.001).

Table 1. Estimation of the area of barren ground along the coast of Jeju

Area	Village area (ha)	Origin area (ha)		Origin rate (%)		Increase rate (%)
		1998	2003	1998	2003	
Jeju-si	646	36	244	5.6	37.8	32.2
Seogwipo-si	1,661	598	741	36.0	44.6	12.4
Namjeju-gun	5,031	1,559	1,806	31.0	35.9	4.9
Bukjeju-gun	7,113	738	1,750	10.4	24.6	14.2
Total	14,800	2,931	4,541	19.8	30.7	10.9

ns; not significant, $^{*}P<0.05$, $^{**}P<0.01$, $^{***}P<0.001$

Table 2. Summary of two-sample *t*-test results for water temperatures recorded during short-term and long-term monitoring at Beophwan (barren ground) and Biyangdo(undisturbed area)

Site Month	Beophwan Mean ± SE	Biyangdo Mean ± SE	*df*	*t*-value	*p*-value
Short-terming monitoring (1992-2004)					
Feb.	15.14 ± 0.30	13.91 ± 0.38	26	-0.68	<0.001***
Aug.	24.45 ± 0.71	25.27 ± 0.64	24	0.434	0.672ns
Long-terming monitoring (1968-2004)					
Feb.	15.31 ± 0.19	14.12 ± 0.14	70	6.74	<0.001***
Feb.	15.32 ± 0.14	14.15 ± 0.13	68	8.29	<0.001***

ns; not significant, *$P<0.05$, **$P<0.01$, ***$P<0.001$

또한 두 해역 모두 장기 수온은 지속적으로 상승하고 있으며(법환 P=0.014, 비양 P=0.026), 연간 변동은 법환 해역이 0.038℃, 비양도 해역 0.025℃씩 증가하고 있다. 한편, 10m층 수온은 단기변화와는 달리 법환 해역이 비양도 해역보다 더 증가한 것으로 나타났다.

3. 무절산호조류의 가입과 생장

계절에 따른 무절산호조류의 피도 변화는 Figure 6에 나타냈다. 법환 해역에서 2월에 투입된 블록의 경우, 4월에는 2.3%였던 피도가 6월에는 9.4%로 완만한 증가를 보였으나, 8월에는 56%로 현저히 증가하였다. 10월에는 77%의 피도를 보였다.

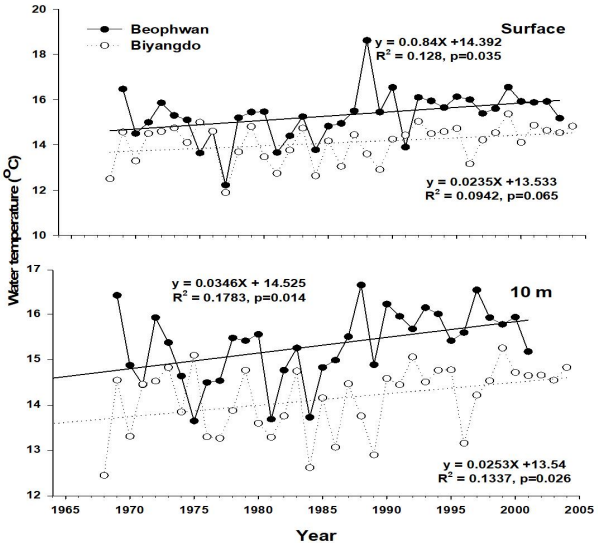

Figure 5. Annual variations in water temperature of the surface layer and 10m layer at Beophwan (barren ground) and Biyangdo (undisturbed area)

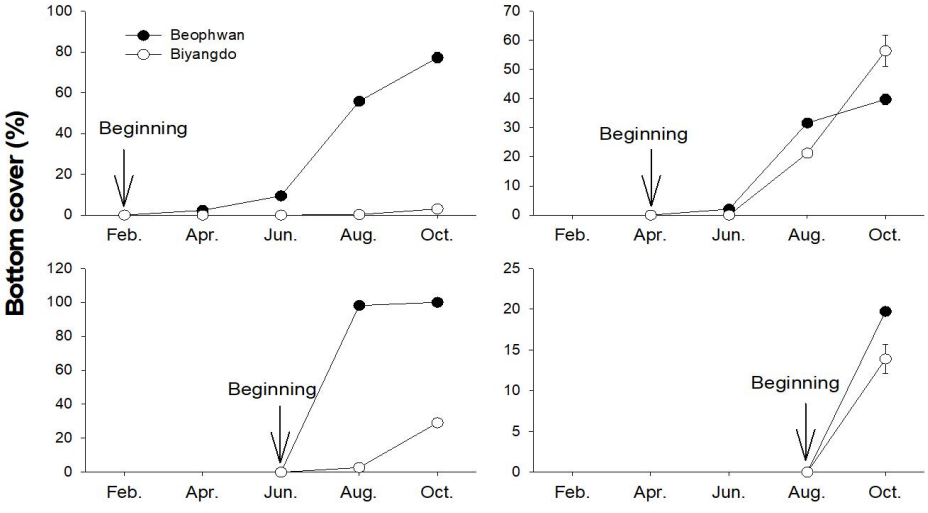

Figure 6. Temporal dynamics of the coverage of crustose coralline algae on artificial substrate at 6m depth at Beophwan (barren ground) and Biyangdo (undisturbed area)

4월에 투입된 블록의 경우, 6월 2%, 8월 32%, 10월 40%로 점진적 증가를 보였다. 그러나 6월에 투입한 블록에서는 8월 피도가 98%를 보였고 10월에는 100%의 피도를 보였다. 8월에 투입한 블록의 경우, 10월 13.9%의 피도를 보였다. 법환 해역의 무절산호조류는 수온이 급상승하는 6월에서 8월 사이에 포자를 방출하며, 급성장함을 시사하고 있다. 비양도 해역에서는 2월, 4월 투입된 블록에서 6월까지는 무절산호조류가 부착하지 않았다. 4월에 투입된 블록의 경우 8월에 21%, 10월에 56%의 피도를 보여 투입된 블록 중 가장 높은 피도 증가율을 보였으나, 6월과 8월에 투입한 블록에서는 조사가 끝난 10월까지도 최고 29%의 피도만을 보였다.

따라서 무절산호조류의 생장도 비양도 해역보다 법환 해역에서 더 빠르게 이행되고 있음을 보였으며, 두 해역 간 무절산호조류의 피복 속도는 차이를 보이고 있다(P=0.020).

가장 빠른 부착을 보인 6월에 시설된 블럭에서의 무절산호조류 피도 증가율은 법환 해역이 2개월 후 98.1%, 4개월 후 100%의 피도를 보인 반면, 비양도 해역에서는 2개월 후 2.7%, 4개월 후 29.0%의 피도를 보였다.

고 찰

갯녹음의 원인에 대해서는 유빙접안, 해류이변, 담수유입, 조식성동물(특히 성게류)에 의한 과도한 식해(Arai and Arai, 1984; Watanabe and C. Horrord, 1991) 등 생물·무생물학적 환경요인들이 복잡하게 관여되어 있는 것으로 알려져 있으나, 최근에는 지구온난화에 의한 수온 상승이 식생의 지리적 분포를 바꿔 놓고 있다는 가설이 주목받고 있다(Hounghton, 1990; Kim and Chang, 1992; Allison, 2005; Kitching and Ebling, 1961; Aptroot and Herk, 2006).

그러나 해역에 따라 생물군집구성에 차이가 있고 발생해역의 지형이나 해수 특성이 다르기 때문에 모든 해역의 발생원인이 같다고 볼 수는 없으며 발생해역을 둘러싼 주변 환경요인들이 상호 복잡하게 관련되어 있는 것으로 보아야 할 것이다.

제주연안의 갯녹음 발생면적은 1998년 2,931ha에서 2003년에는 4,541ha로, 전체 마을어장 면적의 30.7%가 발생한 것으로 나타나 5년 동안 10.9%나 증가했다. 또한 발생해역도 1998년에는 제주도 남부인 서귀포시와 남제주군 일부해역에서 발생되었으나, 2003년에 들어서는 제주도 북동부 해역인 조천읍, 구좌읍을 제외한 전 해역에서 확산되었다.

그러나 2013년 한국수산자원관리공단에서 초분광항공영상을 이용하여 제주도 연안의 갯녹음 진행상태를 조사한 결과, 조천읍, 구좌읍 해역도 광범위하게 갯녹음이 발생된 것으로 보고하고 있다(Figure 7). 이와 같은 현상은 비단 제주도뿐만 아니라 동해안 해역에서도 광범위하게 관찰되고 있다.

갯녹음의 원인으로 많은 연구자들은 조식성동물에 의한

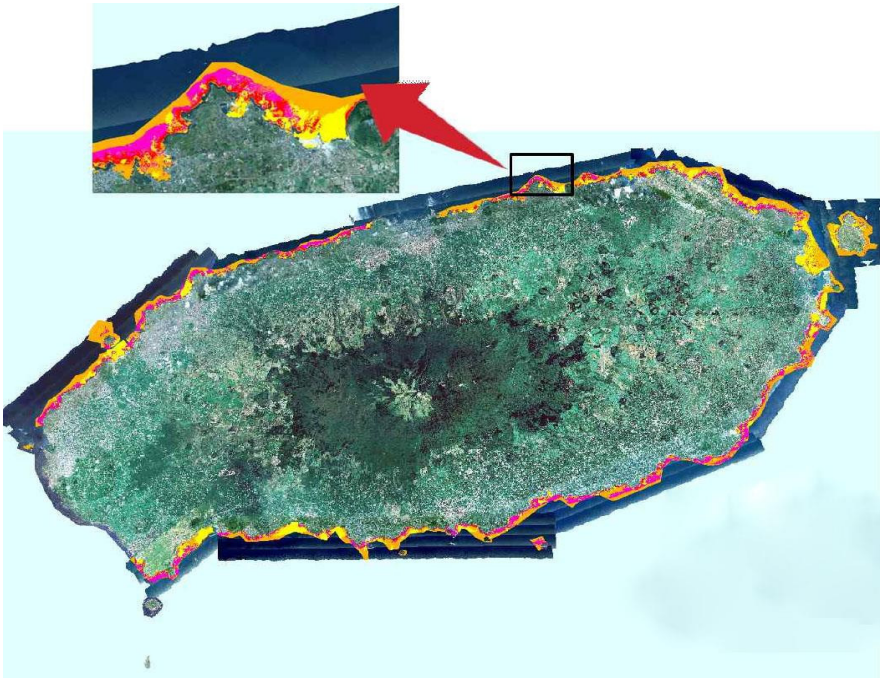

Figure 7. Maps of barren ground along the coast of Jeju in 2013(● Serious stage ● Progression stage ● Normalcy stage ● Sand area)

식생파괴의 현상으로 성게류의 과도섭식에 초점을 맞추어 왔다(Fuji and Kawamura, 1970; Lowry and Pearce, 1973; Breen and Mann, 1976; Lang and Mann, 1976; Pearse and Hines, 1979; Duggins, 1981; Wharton and Mann, 1981; Wharton and Mann, 1981; Hagen, 1995; Benedett and Cinelli, 1995; Agateuma, 1997; Teresa and Simone, 2002).

그러나 기후변화에 따른 지속적인 수온상승도 해중림 파괴에 중요한 요인으로 작용하고 있다. Tenger and Dayton(1987)은 기후변화에 의해 1982-1984년까지 발생한 El-Nino와 1888-1889년까지 발생한 La-Nina의 결과로 미국 갤리포니아 연안에서 kelp 숲의 천이과정과 개체군 역할, 종간 경쟁에 상당한 영향을 미쳤음을 지적하였다.

해중림을 구성하는 대형 해조류인 감태 군락의 쇠퇴가 수온상승과 관계가 있다는 것은 Serisawa *et al.*(2004)이 상세히 기록하고 있다. 그는 일본 Tosa 만에서 70년대 이전과 80년대, 90년대, 2000년대의 수온을 분석한 결과, 지속적인 수온상승을 보였고 이로 인해 70년대 이전에 Tosa 만에 서식했던 감태 군락은 완전히 사라졌음을 지적하고 있다.

이 연구가 이뤄진 2개 해역도 무성했던 감태 군락은 거의 소멸되었고 그 자리를 유절산호조류가 차지하고 있었다. 따라서 이들 해역에서 2차적인 갯녹음 원인은 수온 상승에 의한 식생변화에 있으며, 해조류 천이가 온대천이에서 아열대 천이로 점차 이행되고 있음을 시사하고 있다.

특히 동계수온이 제주연안에서 해중림을 구성하는 대형 갈조류의 유엽 출현시기임을 감안할 때 이 종들의 입식에 상당한 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

1968년부터 2004년까지 관측된 2개 해역의 평균 수온은 법환 해역이 비양도 해역보다 1.2℃가 높게 나타나고 있다. 수온의 장기변동에서 법환 해역은 매년 0.038℃가 증가한 반면, 비양도 해역은 0.024℃가 증가하여 갯녹음 현상이 심한 법환 해역이 더 높은 증가를 보이고 있다.

기후변화로 인한 수온상승의 결과로 제주연안에서 갯녹음 발생면적은 1998년에는 2,931ha였으나, 2003년에는 4,541ha로 5년 전에 비해 10.9%가 증가하였다. 또한 최근에 초분광항공영상으로 분석된 제주해역의 갯녹음 발생비율은 마을어장(수심 10m 이내)의 38%가 갯녹음이 진행 중인 것으로 보고되고 있다(Korea Fisheries Resources Agency, 2012). 제주지역 이외에도 동해안의 경우 61.7%, 남해안도 32.7%가 갯녹음이 발생된 것으로 나타났다. 발생해역도 1998년은 제주도 남부해역에서 주로 발생했으나, 2012년에는 제주도 전역으로 확산되고 있다.

제주연안에서 1968년부터 관측된 연간 수온 증가 값은 갯녹음 해역이 0.038℃, 해중림 해역이 0.024℃씩 꾸준히 증가하고 있다. 이와 같은 원인은 기후변화로 인한 수온증가가 제주도 갯녹음을 확산시키고 있음을 시사하고 있으며 갯녹음을 유발하는 원인생물인 무절산호조류도 갯녹음 해역이 해중림 해역보다 월등히 빨리 확산되고 있음을 보여 기후변화로 인한 수온 상승이 제주도 갯녹음 확산에 상당한 영향을 미친 것으로 보인다.

REFERENCES

Agateuma, Y.K., A. Mateuyma, A. Nakata, T. Kawai and N. Nishikawa(1997) Marine algal succession on the coralline flats after removal of sea urchins in Suttsu Bay on the Japan Sea coast of Hokkaido. Japan, Nippon Gakkaishi 63(5): 672-680.

Allison, L.P., P.J. Low, J.R. Ellis and J.D. Reynold(2005) Climate change and distribution shifts in marine fishes. Science Express. 308: 1912-1915.

Aptroot A. and C.M. Herk(2006) Further evidence of the effects on global warming on lichens, particularly those with Trentepohila phycobionts. Environmental Pollution xx: 1-6.

Arai, S. and A. Arai(1984) Effects of grazing on algal succession I. Japan Journal of phycology. 32: 43-51.

Benedett C.L. and F. Cinelli(1995) Habitat heterogeneity, sea urchin grazing and the distribution of algae in littoral rock pools on the west coast of Italy (Western Mediterranean). Marine Ecology Progress Series. 126: 203-212.

Breen P.A. and K.H. Mann(1976) Changing lobster abundance and destruction of kelp beds by sea urchins. Marine Biology. 34: 137-142.

Chung H.S., K.W. Cho, K.H. Chung, J.H. Kim, J.H. Shin, Y.W. Seo, J.S. Kang and I.K. Lee(1998) Ecological characteristics of zone whitening in coastal on of Seogwipo area, Cheju island. Algae. 13(3), 361-374. (in Korean with English abstract)

Duggins, D.O.(1981) Sea urchins and kelp: The effects of short term changes in urchin diet. Limnology Oceanography. 26: 391-394.

Fuji A. and K. Kawamura(1970) Studies on the biology of the sea urchin. VII. Bioeconomics of the population of *Storongylocentrotus intermedieus* on a rocky shore of southern Hokkaido. Bulletin Japan Society Fisheries. 36: 763-75.

Fujita D.(2010) Current status and problems of iosyake in Japan. Bull. Fish. Res. Agen., 32, 33-42.

Hagen, N.T.(1995) Recurrent destructive grazing of successionally immature kelp forests by green sea urchins in Vestfjorden, Northern Norway. Marine Ecology Progress Series. 123: 95-106.

Hounghton, J.T., G.j. Jenkins and J.J. Ephraums(1990) Intergovernmental panel on the climate change, the IPCC scientific assesment report prepared for IPCC by working group 1. University of Cambridge Press, Cambridge. 364.(Korean with English abstract)

Kang, R.S., H.S. Park, K.S. Won, J.M. Kim and C. Levings(2005) Competition as a determinant of the upper limit of subtidal kelp *Ecklonia stolonifera* Okamura in the southern coast of Korea. Journal of Marine Biology Ecology. 314: 41-52. (in korea with English abstract)

Kim D.K. and D.S. Chang(1992) A study on the artificial formation of seaweed beds on artificial reefs. Bulletin National Fisheries Research and Development Institute. 46: 7-19. (in Korean with English abstract).

Kim, D.K., D.S. Ha, Y.J. Kang, J.T. Yoon and S. Rho(2002) Change of distribution of inhabitation organism at whitening area in the coastal of Jeju island. Bulletin National Fisheries Research and Development Institute. 61: 12-21. (in Korean with English abstract)

Kim, H.G.(2002) Vegetational Characteristics of barren grounds on the eastern coast of Korea. APPF joint conference. p. 34. (in Korean with English abstract)

Kim, M.K., J.K. Shin, J.H. Cha(2004) Variation of species composition of benthic algae and whitening in the coast of Dokdo Island during summer. Algae, 19(1):69-78.

Kitching J.A. Kitching and F.J. Ebling(1961) The ecology of lough ine. XI. the control of algae by *Paracentrotus lividus* (Echinoidea). Journal Animal Ecology. 30: 373-383.

Korea Fisheries Resources Agency(2012) Detection of whitening event using hyperspectral imagery(A case of the coastal areas of Jeju Island, Korea). Korea Fisheries Resources Agency Research and Report, p 183. (in korea)

Lang C. and K.H. Mann(1976) Changes in sea urchin population after the distribution kelp beds. Marine Biology. 36: 321-326.

Lee, K.W., C.H. Shon and S.C. Chung(1998) Marine algal flora and grazing effect of sea urchins in the coastal waters of Cheju island. Journal of Aquaculture. 11(3): 401-419, (in Kim, M. K., J. K. Shin and J. H. Cha(2004) Variation of species composition of benthic algae and whitening in the coast of Dokdo island. Algae. 19(1): 69-78. (in Korean with English abstract)

Lowry L.F. and J.S. Pearce(1973) Abalones and sea urchins in an area inhabited by sea otters. Marine Biology. 23: 213-219.

Pearse J.S. and A.H. Hines(1979) Expansion of a central California kelp forest following the mass mortality of sea urchin. Marine Biology. 72: 243-247.

Seong, K.T., J. D. Hwang, I.S. Han, W.G. Go, Y.S. Suh, J.Y. Lee(2010) Characteristic for long-term trends of temperature in the Korea water. J. Kor. Soc. Mar. Env. 16(4);353-360.

Serisawa, Y., Z. Imoto, T. Ishikawa and M. Ohno(2004) Decline of the *Ecklonia cava* population associated with increased seawater temperature in Tosa Bay, southern Japan. Fisheries Science. 70: 189-191.

Tenger M.J. and P.K. Dayton(1987) El Nino effects on southern California kelf forest communities," Advances Ecology Resource. 17: 243-279.

Teresa A. and M. Simone(2002) Effects of sea urchin grazing on seagress (*Thalassodendron cillatum*) beds of a Kenyan lagoon. Marine Ecology Progress Series. 226: 255-263.

Vadas, R.L., S. Johnson, T.A. Norton(1992) Recruitment and mortality of early post-settlement stages of benthic algae. Journal of Phycology. 27: 331-351.

Watanabe J.M. and C. Horrord(1991) Destructive grazing by sea urchin *Strongylocentrotus* spp. in a central Califonia kelp; potential on recruitment, depth, and predation. Marine Ecology Series, 71: 12-14.

Wharton W.G. and K.H. Mann(1981) Relationship between destructive grazing by the sea urchin, *Strongylocentrotus droebachiensis*, and the abundance of American lobster, *Homarus americanus*, on the Atlantic coast of Nova Scotia. Canada Journal Fisheries Aquatic Science. 48: 1339-1349.

Wootton, J.T.(2002) Mechanisms of successional dynamics: Consumers and the rise and fall of species dominance. Ecology Resource. 17: 249-260.