Article

2008년 여름철 북부 동중국해에서 대규모 녹조(가시파래) 출현

최동림^{1*} · 노재훈² · 유주형³ · 이재학⁴ · 장풍국¹ · 이태희¹ · 최동한²

¹한국해양연구원 남해연구소
(656-830) 경상남도 거제시 장목면 장목1길 41

²한국해양연구원 해양생물자원연구부

³한국해양연구원 해양위성센터

⁴한국해양연구원 기후·연안재해연구부
(425-600) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

Occurrence of Green Macroalgae (*Ulva prolifera*) Blooms in the Northern East China Sea in Summer 2008

Dong-Lim Choi^{1*}, Jae-Hoon Noh², Joo-Hyung Ryu³, Jae-Hak Lee⁴,
Poong-Kuk Jang¹, Taehee Lee¹, and Dong-Han Choi²

¹South Sea Research Institute, KORDI
Geoje 656-830, Korea

²Marine Living Resources Research Department, KORDI

³Korea Ocean Satellite Center, KORDI

⁴Climate Change & Coastal Disaster Research Department, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : This study examined extensive patches of floating green macroalgal (*Ulva prolifera*) mats in the northern East China Sea (ECS) using satellite images from mid May through July 2008 and field observation made during early August 2008 cruise. It was previously reported that the massive macroalgal blooms occurred in the coastal areas of Qingdao in China. During our field survey, researchers noticed widely distributed floating patches of macroalgal mats ranging in size from tens of centimeters to a few hundred meters in diameter. Meteorological data in the northern ECS showed high irradiance, high air-temperature, and predominant southerly winds in summer. In the study area during the survey period, surface waters were characterized by the Changjiang Diluted Water (CDW) mass, which contained high concentrations of nitrate and phosphate. The internal transcribed spacer (ITS) sequence of *U. prolifera* found in the northern ECS was the same as those of *U. prolifera* sampled from Qingdao blooms, suggesting a possibility that *U. prolifera* found in two regions would be derived from the same origin. We suggest that *U. prolifera* in the nearshore Jiangsu Province drifted into the northern ECS and proliferated under favorable meteorological and oceanographic conditions during the summer of 2008.

Key words : green macroalgae, *Ulva prolifera*, northern East China Sea, Changjiang Diluted Water (CDW)

*Corresponding author. E-mail : dlchoi@kordi.re.kr

1. 서 론

2008년 6월 하순경에 중국 칭다오(Qingdao) 연안은 해류를 따라 엄청난 양의 녹조류인 가시파래(*Ulva prolifera*)가 밀려왔다. 이 시기에 칭다오 연안에서 약 100만톤의 가시파래가 육지로 수거되었으며 200만톤은 바다에서 가라앉았다. 가시파래의 대증식 현상은 황해뿐 아니라 제주도 남쪽해역을 포함한 동중국해 북부해역에서도 8월 초에 목격되었다.

가시파래의 발생 원인은 중국 지양수성 주변 해안의 김 양식 수확 과정에서 가시파래 종자의 외해 유출과 대량 번식에 의한 것으로 알려졌다(Sun et al. 2008; Liu et al. 2009). 시간대 별 위성 영상 자료는 5월 중순에 가시파래가 지양수 연근해역에서 소규모 덩어리로 최초 출현한 후 점차 북쪽으로 이동하면서 발생면적도 점차 증가하여 7월에는 칭다오의 전체 해역을 덮을 만큼 광대하게 분포하는 것을 보여주었다(Hu and He 2008).

일반적으로 녹조류는 조건대나 해안 암반에서 부착하여 서식하며 해수의 수온·염분과 질소 영양염, 그리고 대기 온도와 광량 등의 수리-대기 조건에 의해 영향을 받으며 성장한다(Fletcher 1996; Merceron and Morand 2004). 국내에서 보고된 가시파래는 제주도를 포함한 한반도 해안의 암반이나 자갈 또는 모래질 바닥에 부착하여 서식하고 있는 것으로 알려져 있다(Kim et al. 1991). 중국 연안에서도 가시파래가 우점하는 해산식물 중의 하나로 보고되었다(Lin et al. 2008). 그러나 이번 가시파래는 연안에서 발생하여 해수에서 알맞은 성장 조건하에 해류와 바람에 의해 부유하며 성장하는 특징을 보여주었다(Sun et al. 2008; Ye et al. 2008; Liu et al. 2009).

최근 들어 녹조류의 대량 발생은 부영양화로 인한 세계적인 현상으로 발생빈도가 점차 증가추세이다(Fletcher 1996; Morand and Briand 1996; Merceron and Morand 2004). 중국의 장강 하구역을 비롯한 연안은 내륙의 도시화와 산업화로 인해 발생한 오폐수 및 농촌의 화학 비료로부터 기인한 영양염류가 강을 통해 과다 배출됨으로써 부영양화가 심화되고 있다(Duan et al. 2007; Li et al. 2007; Zhang et al. 2007). 이로 인해 이 지역은 적조와 해파리 대번식이 빈번히 발생하고 있고(Tang et al. 2006; Yoon et al. 2008; Zhou et al. 2008), 빈산소(hypoxia) 영역도 확대되고 있다(Chen et al. 2007; Wei et al. 2007). 칭다오 해역에서 2007년 녹조의 소규모 발생에 이어 2008년 대량 발생은 오염화와 온난화 등의 급격한 해양환경 변화를 주요 원인으로 보고 있다(Sun et al. 2008). 특히 이들 유해 생물들은 중국연안에 국한하여 발생하지 않고, 황해 연안류나 장강 저염분수의 해류 순환 체계와 연

관되어 북부 동중국해와 우리나라 남해에도 직접적인 영향을 미치고 있다(양 등 2000; Lee 2008; Yoon et al. 2008).

본 연구의 목적은 제주도 남쪽해역에서 과거에 보고된 바 없는 가시파래의 분포 지역과 발달 형태를 기술하고, 이 당시 연구해역에 해양환경 및 기상 특성을 분석하여 가시파래의 대규모 출현에 대한 원인을 밝히는데 있다.

2. 연구지역의 해황

연구지역인 북부 동중국해는 중국 장강 하구에서 제주도를 포함하여 남해까지 연장되는 해역으로서, 북쪽에서 남부 황해 해역과 접하고, 동쪽으로는 일본 규슈에 의해 경계되며, 북동쪽 대한해협을 통해 동해와 연결된다(Fig. 1). 해저지형은 중국 장강 하구에서 제주도 남동해역까지 서서히 깊어지는 넓은 대륙붕이 형성되었으며, 동쪽을 향해 대륙사면이 발달해 있다.

북부 동중국해는 고온고염의 대양수계인 대만난류 TWC(Taiwan Warm Current), 쿠로시오 지류인 대만난류 TSWC(Tsushima Warm Current), 저온저염의 연안수계인 황해 연안류 YSCC(Yellow Sea Coastal Current) 및 계절적으로 장강 저염분수 CDW(Changjiang Diluted Water) 흐름이 혼합되는 해류 순환체계 특성을 갖는다(Fig. 1). 대만난류는 대만과 중국 대륙사이에서 발달하여 동중국해 대륙붕의 등심선을 따라 연중 북동향하는 해류로서, 표층수는 고온이지만 연안의 저염수와 혼합되어 비교적 저염의 특성을 갖는다(Yuan and Su 1988). 쿠로시오 해류는 대만 동부에서부터 대륙사면을 따라 북동향하며 일본 남쪽 연안으로 이동하며, 일부 북쪽으로 분기된 대만난류는 대한해협을 통해 동해로 유입된다(Ichikawa and Beardsley, 1993; Hsueh et al. 1996).

연구지역의 북동쪽인 남부 황해에서 중국 연안을 따라 북부 동중국해로 년중 흐르는 황해연안류가 존재하며, 이 해류는 남쪽에서 불어오는 여름철 계절풍에 의해 표층수는 북쪽으로 이동하지만 바로 아래 해수(sub-surface water)는 남쪽으로 흘러 장강하구에서 발생한 장강 저염분수와 합류한다(Guan 1994; Lin et al. 2002; Yuan et al. 2008). 장강 저염분수는 남풍이 우세한 하계동안 장강 하구에서 동쪽을 향해 북부 동중국해로 이동하고, 북풍이 강한 동계에는 중국 남부 연안을 따라 남쪽으로 흐른다(Beardsley et al. 1985; Ichikawa and Beardsley 2002). 여름철 장강 저염분수의 이동 양상은 북부 동중국해역에서 물덩어리 형태(patch type)로 제주 해역을 지나 남해와 동해로 이동하는 특성을 갖고 있다(Lie et al. 2003).

Fig. 1. Regional map of the Yellow and East China Seas. The study areas are boxed. The contour unit is in meter (m). Arrows indicate the Yellow Sea Coastal Current (YSCC), the Changjiang Diluted Water (CDW), the Taiwan Warm Current (TWC), the Tsushima Warm Current (TSWC), and the Kuroshio Warm Current (KWC)

3. 연구 재료 및 방법

조사해역의 가시파래의 발달 규모 및 특성은 한국해양연구원 종합조사선 이어도호를 이용하여 현장 관측조사를 실시하는 동안 관측되었다(Fig. 1). 조사 해역내 22개 정점에 대해 SBE 911 CTD(SeaBird)를 이용하여 수온·염분을 관측하였다. 또한 이들 정점에 대한 질산염과 인산염 농도는 CTD에 고정된 로켓 샘플러의 10-L Niskin 물통을 이용하여 채취된 해수 1L을 0.7 µm Whatman GF/F로 여과하여 여과액 100 ml을 냉동 보관한 후, 실험실에서 자동 영양염 분석기(Flow Injection Analyser, QuickChem 8000, LACHAT Co.)를 이용하여 분석하였다. 조사지역 중앙부에 위치한 이어도 해양과학기지에 설치된 CTD와 기상관측 자료를 이용하여 각각 표층 수온·염분과 대기 환경(기온, 강수량, 일사량)의 일일변화량을 분석하였다. NASA의 MODIS 위성관측 자료를 이용하여 가시파래의 시공간적 발달과 분포양상을 파악하였으며, MODIS 영상은 250 m 해상도를 갖는 육상분석용 밴드 자료를 사용하였다. 더불어 영상 공간 해상도가 4 m 인 Kompsat-2의 육상관측 위성자료를 추가 활용하여 가시파래의 공간 분포에 대한 상세 분석을 하였다. 가시파래의 계통분류학적 연구를 위해 ITS(Internal Transcribed Spacer) 염기서열의 분석을 이용하였다. DNA는 냉동한 가시파래를 녹인 후,

STE buffer와 silica/zirconium bead를 넣어 약 1분간 vortexing하여 추출하였다. DNA 시료를 원심 분리하여 상층액을 취한 후 Shimada et al. (2008)의 방법에 따라 PCR을 수행하였다. 증폭된 DNA의 염기서열은 automatic sequencer(ABI3730XL)를 이용하여 분석하였다. 얻어진 염기서열은 일본과 중국을 포함한 여러 해역에서 얻어진 *Ulva*의 ITS의 염기서열과 clustalx 프로그램을 이용하여 자동 정렬(alignment) 되었으며, 얻어진 정렬은 수작업을 통해 수정되었다. 계통수는 정렬된 염기서열을 이용하여 Mega 3.0 프로그램(Tamura et al. 2007)에서 neighbor-joining 방법으로 얻어졌다.

4. 연구 결과

현장관측

조사지역의 계획된 항해측선을 따라 조사선이 지나가는 항로에서 부유성 가시파래가 광범위하게 분포하고 있는 것을 육안으로 관측하였다(Fig. 2). 가시파래 덩어리는 직경이 약 수십~300 m 이상 규모의 타원체 또는 띠 모양에서 수십 cm~수 m 규모의 작은 조각 형태로 분포하였다. 작은 덩어리는 전 조사구역에서 확인되었고(Fig. 2a), 커다란 가시파래 덩어리는 주로 제주도 남쪽 해역에 집중적으로 발견되었다(Fig. 2b). 커다란 가시파래 덩어리 속에

Fig. 2. Distribution of green and red tides in the northern East China Sea. Green dots and dashed lines indicate areas of small green macroalgal fragments and large scale green macroalgal patches, respectively. Insets show photos of (a) green macroalgal fragments, (b) a large scale green macroalgal patch, (c) green macroalgal mats on the beach in Cheju Island, and (d) a red tide patch

Fig. 3. Monitoring of massive green macroalgal blooms identified from MODIS imagery in the northern East China Sea from May through July 2008. Elliptical areas indicate green macroalgal bloom areas on 14 May (yellow color), 20 May (green color), and 17 July (violet color). Inserted boxes indicate (a) MODIS NDVI image on 14 May, (b) MODIS NDVI image on 17 July, and (c) Kompsat-2 MSC image on 28 July

포함된 중국산 맥주병, 비닐 봉지, 어구용 플라스틱 부이 및 음료 페트병 등이 수거되었다. 제주도 남서 해안에서 8월 2일 발견된 가시파래들은 당시 15 m s^{-1} 이상의 강한 남풍계열 바람과 파고 3~4 m의 파도에 의해 이동된 것으로 판단된다(Fig. 2c).

조사기간 이전인 7월 24일 제주도 서측 인근 해역과 쓰시마 남서쪽 약 50 km 떨어진 해상에서 수십 cm 미만의 작은 가시파래 파편들이 관측된 것이 알려졌다. 또한 8월 13일에도 부산 해운대 해변에서 작은 가시파래 파편들이 분포하고 있음을 확인한 바 있다.

위성관측

중국연안부터 우리나라 남해까지의 해역에 대해 2008년 5월 14일에서 8월 4일까지 총 18개의 MODIS 영상자료를 분석하여 가시파래의 발생 초기부터의 발달 분포를 파악하였다. 이들 영상 중 5월 14일, 20일, 그리고 7월 17일자 자료에서 황해 남부해역과 북부 동중국해역에 가시파래 덩어리들이 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 이들 각각의 시간별 영상은 가시파래 덩어리가 황해 남부해역에서 북부 동중국해역으로 이동하는 양상을 보여준다. 이동하는 가시파래의 분포 형태는 동-서 내지 북동-남서 방향의

타원체 덩어리 또는 띠 모양을 이루고 있다. 특히 7월 17일 영상은 동쪽의 가시파래 발달과 함께 서쪽 해역에 넓은 적조의 분포가 확인되었다(Fig. 3b). 8월 4일 현장조사시에도 조사지역 서측에서 적조가 넓게 분포하고 있는 것을 육안으로 관측하였다(Fig. 2d). 이들의 주요 적조 생물은 *Noctiluca scintillans*와 *Akashiwo sanguinea*로 확인되었다. 7월 27일의 고해상도 Kompsat-2 영상으로부터 이어도 과학기지 주변해역에 발달한 가시파래 덩어리를 보다 자세하게 확인할 수 있었다(Fig. 3c). 특히 이어도 기지 서쪽 해역에서 약 8 km 길이의 북동-남서방향의 띠를 이룬 가시파래 덩어리들이 약 100~200 m의 폭과 약 200~800 m 길이로 발달하였다.

해양 관측 자료

바람 특성

해양조사선 이어도호에서 관측된 바람자료에 의하면, 해양조사 기간 동안 평균 5.5 m s^{-1} 이상 남풍계열의 바람이 지배적이었고, 최대 풍속은 17.4 m s^{-1} 이었다(Fig. 4a). 남풍 계열의 바람은 여름철 북부 동중국해역에서 나타나는 일반적인 하계 몬순의 특징이다.

표층 수온 및 염분도

현장관측기간 중 조사지역내 표층수온의 분포 범위는 약 $25.3\sim 29.9^\circ\text{C}$ 이며, 평균 수온은 28.1°C 였다(Fig. 4b). 서측에서 동쪽해역으로 갈수록 점차 고온화하는 동고서저 양상을 보였으며, 조사지역 중앙부가 주변보다 높은 설상형의 분포로 나타났다. 표층 염분은 $28.3\sim 31.5 \text{ psu}$ 사이로 분포하며, 평균 염분은 약 30.0 psu 였다. 30 psu 이하의 장강 저염분수괴는 제주도 남서쪽 해역에 북서-남동 방향의

장축 거리 약 250 km 이상과 북동-남서 방향의 약 120 km 단축 거리 규모의 타원체 형태로 분포하며, 최대 두께는 15 m 정도였다. 이 장강저염분수괴의 평균 염분은 약 29.3 psu 였다.

표층 영양염 분포

표층해수의 질산염 농도는 조사지역의 서측 해역과 남동쪽 경계부에서 각각 $3.5 \mu\text{mol l}^{-1}$ 과 $5.0 \mu\text{mol l}^{-1}$ 의 높은 값을 보이고, 중앙부에 $1.0 \mu\text{mol l}^{-1}$ 이상이 분포했다(Fig. 4d). 인산염은 서측 해역의 1개 정점에서 최대 $0.6 \mu\text{mol l}^{-1}$ 의 농도가 나타나며, 나머지 지역에서 $0.1 \mu\text{mol l}^{-1}$ 이하의 농도를 보였다(Fig. 4e). 특히 서측 조사해역의 높은 질산염과 인산염 농도 분포지역이 적조 관측지역과 일치함에 따라, 고농도의 영양염이 적조 발생에 영향을 미친 것으로 판단된다.

이어도 과학기지 자료

대기환경

이어도 과학기지의 기상관측으로부터 봄과 여름철의 평균 대기온도, 강수량, 그리고 일사량 자료를 이용하여 일일 변화 분포도를 작성하였다(Fig. 5). 평균 대기온도는 5월초에 약 15°C 에서 6월말에 약 20°C 로 점차 증가하였다. 이어서 7월초부터 기온이 빠르게 상승하여 7월 16일 경에 최대 27°C 까지 상승하였다. 이후에도 약 28°C 의 평균 온도를 8월 중순까지 유지하다 서서히 내려가는 경향을 보였다. 강수량은 5월에는 15일 동안 약간의 비가 내리다 6월 들어 20일 이상 집중적으로 비가 내렸다. 7월에는 초순경 약간의 강우를 제외한 맑은 날이 대부분 계속되었으며, 8월에 들어 다시 비가 내리는 날이 증가하였다. 일

Fig. 4. Distributions of (a) wind direction and velocity (m/s), (b) surface temperature ($^\circ\text{C}$), (c) surface salinity (psu), (d) surface nitrate ($\mu\text{mol/l}$), and (e) phosphate ($\mu\text{mol/l}$) in the study area surveyed between 1-6 August 2008

Fig. 5. Time series of daily average meteorological and sea surface observations at the Jeodo Ocean Research Station tower from May through August 2008

Fig. 6. Neighbor-joining tree of *Ulva* sp. obtained from sea waters around Cheju Island. The tree was constructed using nuclear encoded ITS sequences including 5.8S rDNA of *Ulva*. Only bootstrap values above 60% are shown (1000 resamplings) at the branching points. Bar indicates 0.005 nucleotide substitutions per site

조랑 관측 값은 맑은 날이 대부분이던 5월과 7월에 높은 반면 많은 비가 내린 6월과 8월에는 낮게 나타났다. 7월초에서 8월 중순까지의 평균 일조량은 $1,283 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이었고, 특히 8월 1일에 $2,251 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 최고치를 보였다.

해양환경

이어도 과학기지에서 관측된 표층 수온 및 염분 자료를 이용하여 장강 저염분수가 조사해역으로 유입되는 시간별

변동 과정을 분석하였다(Fig. 5). 표층 수온은 5월 1일경 10°C 에서 7월 1일 약 20°C 까지 완만하게 상승한 이후, 7월 18일까지 28°C 로 빠르게 상승하였다. 이후에 평균 28°C 의 수온이 8월 20일까지 지속된 후 다시 하강하였다. 표층 염분은 7월 1일부터 15일까지 평균 30.3 psu로 큰 변화를 보이지 않다가, 7월 16일에 30.0 psu 이하의 장강 저염분수가 첫 출현한 이후 8월 10일까지 지속적으로 저염분수가 나타났다. 7월 16일에서 8월 10일까지의 평균 염분은 27.5 psu 이고, 7월 26일에 25.5 psu의 최저염분수가 나타났다.

Fig. 7. The ITS tree of *Ulva* sp. obtained from Qingdao blooms and coastal areas of China. The tree was modified from Pang et al. (2010)

*Ulva prolifera*의 ITS 염기서열 분석결과

제주해역의 *Ulva prolifera*에 대한 ITS 염기서열 분석결과는 최종적으로 522 bp의 염기서열이 얻어졌으며, 일본, 중국 및 영국에서 분리된 *Ulva* sp.의 염기서열과 100% 일치하는 것으로 나타났다(Fig. 6). Pang et al. (2010)에 의해 2008년 황해에서 변성한 가시파래에 대한 계통분석 연구에서 얻어진 염기서열이 GenBank database에 공개되어 있지 않아 직접적인 비교는 어렵지만, 다른 염기서열 자료들과 비교할 때 제주 해역에서 분리된 가시파래는 칭다오 대변식에서 분리된 *Ulva* sp. 2008b 및 2008c와 동일한 염기서열을 갖는 것으로 파악되었다(Fig. 7). 이러한 결과는 제주 해역에서 발견된 가시파래가 칭다오에서 대변성을 일으킨 가시파래와 최소한 계통분류학적으로 다르지 않음을 시사한다.

5. 토의 및 결론

황해 남부 및 북부 동중국해역에서 가시파래 덩어리가 분포하는 것을 5월 14일 MODIS 영상으로 확인하였다. 황해에서 발생한 첫 가시파래도 5월 14일자 MODIS 위성 사진을 통해 지양수 외해역에서 발견 이후 북쪽으로 이동

하면서 6월말에 최대 면적 약 40,000 km²까지 확산하며 칭다오 해안으로 밀려들어와 8월 초순 소멸할 때까지 분포하였다(Hu and He 2008; Liu et al. 2009). 이 지역의 해양환경은 7월말 현장 관측 결과로부터 표층수온 약 25.5 °C, 최고 질산염 농도 1.1 μmol l⁻¹을 보였고, 실내 실험에도 수온 25 °C, 염분 24 psu, 그리고 일조량 72 μmol m⁻² s⁻¹ 조건하에서 가시파래의 생장을 확인하였다(Sun et al. 2008). 이 가시파래에 대한 배양 실험에서 수온 0~30 °C와 일조량 0~30 μmol m⁻² s⁻¹의 범위에서 생존했고, 또한 가시파래가 소멸될 때도 해저면에 상당량 분포하고 있는 것이 관측된 바, 이들이 열악한 환경 조건에도 충분히 살 수 있음을 확인하였다(Ye et al. 2008).

5월 이후 황해 남부 및 북부 동중국해역의 가시파래 발견 당시 해양환경은 위성 표층 수온자료 뿐만 아니라 이 어도 과학기지의 표층수온과 염분자료를 통해 확인하였다. 조사해역을 포함한 서부 황해의 5월과 6월의 인공위성관측 표층수온 자료에 의하면 13~16 °C와 16~20 °C 범위였다(Liu et al. 2009). 그리고 이 어도 과학기지에서 획득한 5월과 6월의 표층 수온 값도 각각 10~17 °C와 17~19 °C 범위로서 위성관측 표층수온 자료와 유사하게 나타났다. 일조량은 5월과 6월의 평균치가 각각 1,114와

761 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 나타났다. 5월보다 낮은 6월의 일조량은 6월동안 대부분 구름으로 인한 햇빛 차단이 주요원인으로 판단된다. Kim et al. (2009)은 2004년 5월 북부 동중국해의 수심 50 m 이하인 해역에서 2.0 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 이상의 질산염과 0.3 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 이상의 인산염을 관측하였는데, 이는 표층과 저층의 강한 수직혼합에 의한 것이라고 보고하였다. 비록 봄철 북부 동중국해의 수온은 7월말의 서부 황해와 8월초의 북부 동중국해 보다 수온이 10 °C 이상의 낮지만, 같은 시기의 서부 황해 해양환경과 유사한 양상은 조사지역에도 가시파래가 생존할 수 있는 충분한 여건이 발달해 있음을 알 수 있다. 8월초 조사해역에서 가시파래가 관측될 때 평균 표층 수온, 염분도, 질산염 농도는 각각 28.1 °C, 30.0 psu, 1.2 $\mu\text{mol l}^{-1}$ 로서, 7월말 칭다오 해역의 환경자료보다 높다. 또한 조사지역의 여름철 평균 일조량은 약 1,283 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로서, Sun et al. (2008)의 실내 실험시 주어진 최대 일조량 72 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 보다 훨씬 높게 나타났다. 따라서 조사지역에서 가시파래가 발견될 당시의 해양환경은 서부 황해의 해양환경보다 양호한 조건이었을 것으로 해석된다.

북부 동중국해의 5월 가시파래 분포지역은 지양수 외해역의 최초 가시파래 발생지역에서 남동쪽으로 약 400 km 이상 떨어져 있다. 과거에 보고된 바 없던 북부 동중국해 공해상에서 관측된 부유성 가시파래의 기원을 파악하기 위해 8월초 현장에서 채집한 가시파래의 형태를 칭다오 해역의 것(Ye et al. 2008)과 비교하여 같은 형태를 이룬 것으로 파악되었다. 또한 ITS 염기서열 분석결과로부터 제주 해역의 가시파래가 칭다오의 가시파래에 대한 최소한의 계통분류학적으로 동일한 염기 서열로 파악됨에 따라 같은 가시파래의 일부로 추정된다. 다만, 분석결과에서와 같이 한국, 일본, 중국에 서식하는 가시파래의 ITS 염기서열이 거의 일치한다는 결과는 가시파래의 지리적 분포에 대한 연구에는 ITS 염기서열이 유용한 정보를 제공하지 않음을 시사하며, 더 높은 지리적 해상력을 갖는 다른 분자 마커의 개발이 필요할 것으로 보인다.

지양수 외해역을 포함한 서부 황해 연안에는 남향 해류인 황해 연안류가 연중 발달해 있다(Guan 1994; Yuan et al. 2008). 이 황해연안류가 지양수 외해역의 가시파래 일부 종자를 남부 황해를 거쳐 북부 동중국해로 이동시킨 운반자 역할을 했을 것으로 사료된다. 이들 가시파래 덩어리의 시·공간적 위치 변화를 추적하기 위해 6월의 위성자료를 분석하였으나 북부 동중국해역이 운무에 가려 분포 여부를 확인할 수 없었다. 이어서 7월 중순부터 8월초까지의 위성자료와 육안관측으로부터 제주도 남부해역에서 대한해협을 포함한 북부 동중국해역의 광역적 가시파래 분포는 이들 해역에 대면식에 적합한 대기 온도 및 일조량의 대기환경과 함께 높은 표층 수온과 장강 저염분수

의 해양환경이 발달하였음을 의미한다. 일반적으로 장강으로부터 공급된 고농도의 질산염과 인산염을 포함하고 있는 여름철 장강 저염분수는 여름철 남풍에 의해 북부 동중국해역을 지나 남해를 거쳐 동해로 이동한다(Gong et al. 1996; Zhang et al. 2007; Kim et al. 2009). 따라서 북부 동중국해와 남해에 발달한 이 가시파래는 여름철 장강 저염분수의 이동경로와 잘 부합되는 것으로 볼 때, 장강 저염분수위가 가시파래의 번식과 수송에 크게 기여했을 것으로 사료된다.

이번 제주도 남서해역에 발달한 가시파래 분석을 통해, 중국 연안에서 발생한 해양생물이 발생지에만 머물지 않고 해류를 타고 우리나라 관할해역까지 유입되고 있음을 시사하고 있다. 최근 중국 장강 하구역 및 연안지역에서 유해생물들의 발생 지역과 주기의 증가 추세는 우리해역에도 직접적 영향을 미칠 수 가능성이 높기 때문에 이에 대한 해양환경 변화 및 영향의 지속적 연구가 필요하다.

사 사

현장조사동안 헌신적으로 도움을 준 한국해양연구원 종합조사선 이어도호 승조원들에게 깊은 감사를 표합니다. 본 연구는 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 해양환경기술개발사업인 “산사댐 건설로 인한 남해(동중국해)의 해양환경 영향 연구(PM55580)”의 일환입니다. 본 논문을 성심껏 검토해 주신 심사위원님들께 감사드립니다.

참고문헌

- 양재삼, 최현용, 정해진, 정주영, 박종규 (2000) 전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생연구: 1. 물리 화학적인 특성. 한국해양학회지 「바다」 5(1):16-26
- Beardsley RC, Limeburner R, Yu H, Cannon GA (1985) Discharge of the Changjiang (Yangtze River) in the East China Sea. Cont Shelf Res 4:57-76
- Chen C, Gong G, Shiah F (2007) Hypoxia in the East China Sea: one of the largest coastal low-oxygen areas in the world. Mar Environ Res 64:399-408
- Duan S, Xu F, Wang LJ (2007) Long-term changes in nutrient concentrations of the Changjiang river and principal tributaries. Biogeochemistry 85(2):215-234
- Fletcher RT (1996) The occurrence of Green Tide-a review. In: Schramm W, Nienhuis PH (eds) Marine benthic vegetation-recent changes and the effects of eutrophication. Springer, Berlin, pp 7-43
- Gong GC, Chen YL, Liu KK (1996) Chemical hydrography and chlorophyll *a* distribution in the East China Sea in

- summer: implications in nutrient dynamics. *Cont Shelf Res* **16**(12):1561-1590
- Guan BX (1994) Patterns and structures of the current in the Bohai, Huanghai and East China Seas. In: Zhou D, Liang Y, Zeng C (eds) *Oceanology of China Seas V1*. Kluwer Academic Publisher, London, pp 17-26
- Hsueh Y, Lie HJ, Ichikawa H (1996) On the branching of the Kuroshio west of Kyushu. *J Geophys Res* **101**(C2): 3851-3857
- Hu C, He M (2008) Origin and offshore extent of floating algae in Olympic sailing area. *EOS* **89**(33):302-303
- Ichikawa H, Beardsley RC (2002) The current system in the Yellow and East China Seas. *J Oceanogr* **58**:77-92
- Kim D, Choi SH, Kim KH, Shim J, Yoo S, Kim CH (2009) Spatial and temporal variations in nutrient and chlorophyll *a* concentrations in the northern East China Sea surrounding Cheju Island. *Cont Shelf Res* **29**:1426-1436
- Kim KY, Ahn YS, Lee IK (1991) Growth and morphology of *Enteromorpha linza* (L.) J. Ag. and *E. prolifera* (Muller) J. Ag. (Ulvales, Chlorophyceae). *Kor J Phycol* **6**(1):31-45
- Lee DK (2008) *Cochlodinium polykrikoides* blooms and eco-physical conditions in the South Sea of Korea. *Harmful Algae* **7**(3):318-323
- Li M, Xu K, Watanabe M, Chen Z (2007) Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem. *Estuar Coast Shelf Sci* **71**:3-12
- Lie H, Cho C, Lee J, Lee S (2003) Structure and eastward extension of the Changjiang River plume in the East China Sea. *J Geophys Res* **108**(2003):3077. doi:10.1029/2001JC001194
- Lin K, Guo B, Tang Y (2002) An analysis on observational surface and upper layer current in the Yellow Sea and the East China Sea. *J Kor Soc Oceanogr* **37**(3):187-195
- Liu D, Keesing JK, Xing Q, Shi P (2009) World's largest macroalgal bloom caused by expansion of seaweed aquaculture in China. *Mar Pollut Bull* **58**(6):888-895
- Merceron M, Morand P (2004) Existence of a subtidal stock of drifting *Ulva* in relation to intertidal algal mat development. *J Sea Res* **52**(4):269-280
- Morand P, Briand X (1996) Excessive growth of macroalgae: a symptom of environmental disturbance. *Bot Mar* **39**:491-516
- Pang SJ, Liu F, Shan TF, Xu N, Zhang ZH, Gao SQ, Chopin T, Sun S (2010) Tracking the algal origin of the *Ulva* bloom in the Yellow Sea by a combination of molecular, morphological and physiological analyses. *Mar Environ Res* **69**:207-215
- Sun S, Wang F, Li C, Qin S, Zhou M, Ding L, Pang S, Duan D, Wang G, Yin B, Yu R, Jiang P, Liu Z, Zhang G, Fei X, Zhou M (2008) Emerging challenges: massive green algae blooms in the Yellow Sea. *Nature proceedings*. doi:hdl:10101/npre.2008.2266.1
- Tamura K, Dudley J, Nei M, Kumar S (2007) MEGA4: Molecular evolutionary genetics analysis (MEGA) software version 4.0. *Mol Bio Evolut* **24**:1596-1599
- Tang D, Di B, Wei G, Ni I, Oh I, Wang S (2006) Spatial, seasonal and species variations of harmful algal blooms in the South Yellow Sea and East China Sea. *Hydrobio* **568**:245-253
- Wei H, He Y, Li Q, Liu Z, Wang H (2007) Summer hypoxia adjacent to the Changjiang Estuary. *J Mar Syst* **67**:292-303
- Ye N, Zhuang Z, Jin X, Wang Q, Zhang X, Li D, Wang H, Mao Y, Jinag Z, Li B, Xue Z (2008) China is on the track tackling *Enteromorpha* spp forming green tide. *Nature proceedings*. doi:hdl:10101/npre.2008.2352.1
- Yoon WD, Yang JY, Shim MB, Kang HK (2008) Physical processes influencing the occurrence of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* (Scyphozoa: Rhizostomeae) around Jeju Island, Korea. *J Plankton Res* **30**(3):251-260
- Yuan D, Zhu J, Li C, Hu D (2008) Cross-shelf circulation in the Yellow and East China seas indicated by MODIS satellite observations. *J Mar Syst* **70**:134-149
- Yuan Y, Su J (1988) The circulation of Kuroshio current structure in the East China Sea-early summer 1986. *Progr Oceanogr* **21**:343-361
- Zhang JS, Liu M, Ren JL, Wu Y, Zhang GL (2007) Nutrient gradients from the eutrophic Changjiang (Yangtze River) estuary to the oligotrophic Kuroshio waters and reevaluation of budgets for the East China Sea Shelf. *Progr Oceanogr* **74**(4):449-478
- Zhou M, Shen Z, Yu R (2008) Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River. *Cont Shelf Res* **28**(12):1483-1489

Received Aug. 12, 2010

Revised Sep. 13, 2010

Accepted Sep. 24, 2010