

태안반도주변에서 춘계 황사 전·후 식물플랑크톤 반응특성과 황사분진 영향평가

유만호* · 윤석현**† · 오현주** · 최중기***

* , ** 국립수산과학원 기후변화연구과, *** 인하대학교 자연과학대학 해양학과

Reaction Characteristics of Phytoplankton Before and After the Yellow Dust Event in Taean Peninsula and Yellow Dust Impact Assessment

Man Ho Yoo* · Seok Hyun Youn**† · Hyun Ju Oh** · Joong Ki Choi***

*, ** Oceanic Climate and Ecology Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

*** Department of Oceanography, Inha University, Incheon 22212, Korea

요약 : 황사가 식물플랑크톤에 미치는 영향을 파악하기 위해, 황사가 발생한 2006년 4월 22 ~ 26일까지 태안반도 인근해역에서 현장조사 및 생리실험을 수행하였다. 황사발생동안 식물플랑크톤 군집은 $26 \sim 290 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 범위로 다소 낮은 현존량과 주요 분류군인 돌말류의 증가, 특히 혼합해역의 대표종인 *Paralia sulcata*와 같은 저서성 돌말류의 증가가 뚜렷하였다. 또한 황사발생 후의 Chl-*a* 농도는 황사 발생 전의 조석에 따른 Chl-*a* 농도변화범위를 초과하였다. 황사투여실험에서는 황사투여 농도가 증가함에 따라 일차생산력은 점차 감소하였고, 최대 탄소 동화계수 역시 같은 경향을 보였다. 48시간 배양실험에서는 황사투여 초기(T0)에 실험구(test)가 대조구(control)에 비해 낮은 일차생산력을 보였으나, 48시간 후(T48)에는 실험구가 대조구보다 높은 일차생산력을 보였다. 특히 실험구는 초기보다 48시간 후의 일차생산력이 약 321%로 크게 증가하였다. 따라서 중국과 인접한 조사해역의 식물플랑크톤은 황사와 함께 수반되는 강한 물리적 환경이 발생초기에 식물플랑크톤의 성장을 일시적으로 저해시킬 수 있으나, 이후 안정적인 수괴가 지속될 경우 식물플랑크톤의 성장을 촉진시키는 잠재적인 요인으로도 파악되었다.

핵심용어 : 식물플랑크톤, 황사, 황해, 일차생산력, 분포, 연안

Abstract : To investigate the effect of yellow dust on phytoplankton, a field survey and physiological experiments were carried out in the waters near Taean Peninsula from April 22 to 26, 2006, when yellow dust occurred. Phytoplankton populations during the yellow dust period were in the range of $26 \sim 290 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, a somewhat low standing crop. An increase in diatoms (a main taxonomic group), especially benthic diatoms such as *Paralia sulcata*, a typical species for active mixed sea water areas, was also remarkable. In addition, the Chl-*a* concentration after yellow dust exceeded the Chl-*a* concentration change range according to the tide before yellow dust. As the concentration of yellow sand increased in a yellow sand treatment experiment, primary productivity decreased, and the maximum assimilation number showed the same tendency. In the 48h culture experiment, primary productivity of the test group was lower than that of the control group at the early stage (T0) of yellow sand treatment, but after 48 hours (T48), the test group showed higher primary productivity than the control group. In particular, the primary productivity of the test group significantly increased to 321% after 48 hours. Therefore, strong physical environment accompanied by yellow dust may temporarily inhibit the growth of phytoplankton in the waters adjacent to China in the early stage of yellow dust, but the formation of stable water mass has also been identified as a potential factor promoting the growth of phytoplankton.

Key Words : Phytoplankton, Yellow Dust, Yellow Sea, Primary Production, Distribution, Coast

* First Author : ryul0005@hanmail.net, 051-720-2234

† Corresponding Author : younsh@korea.kr, 051-720-2233

1. 서론

황사란 중국과 몽고의 사막지대나 건조지역 등에서 강한 바람의 영향으로 대기 중에 부유되어 이동되는 먼지를 말하며(Lin, 2001), 황해를 포함한 북동 아시아 주변해역은 중국 대륙의 사막에서 불어오는 북서계절풍에 의해 세계적으로 가장 대기 먼지가 많은 해역 중 하나이다(GESAMP, 1989). 최근 40년 동안 우리나라에 영향을 미치는 황사횟수는 점차 증가하고 있고, 주로 봄에 Taklamakan Desert(27%), Northern China Desert(33%), Gobi Desert(38%)가 우리나라에 영향을 미치는 주요 황사 발원지로 중국 전체 황사의 98%를 일으킨다(Laurent et al., 2005; Kim, 2008). 중국 황사는 연간 $\sim 800 \text{ Tg}\cdot\text{yr}^{-1}$ 로 전 세계 황사량의 50% 이상을 차지한다(Andreae, 1995; Duce, 1995; Zhang et al., 1997). 중국 황사의 30%는 발원지에 다시 퇴적되며, 20%는 중국대륙 내에 퇴적되고 나머지 50%는 한국, 일본 등의 여러 지역에 영향을 준다고 보고되었다(Zhang et al., 1997). 황사는 강한 바람에 의해 "Dust Storm"을 발생시키며 한국과 일본에 영향을 미치는 황사입자는 주로 2~20 μm 정도이다(Zhang et al., 1999). 미세 황사입자는 인간의 건강, 농업, 교통 등에 영향을 미치기도 하며, 최근에는 전 지구적 기후 변화와 관련하여 태양광을 반사 혹은 흡수하여 기후변화를 야기하는 한 요인으로도 보고되었다(Shine and Foster, 1999; Alpert et al., 2000; IPCC, 2001; Sokolik et al., 2001). 또한 황사는 다량의 무기영양염류(질산염, 황산염, 인산염 등)와 미량원소(Mg, Al, Si, K, Ca and Fe)를 포함하며, pollutant elements(As, Sb and Se)와 Local pollutants(Pb, Zn, Cd and Cu)도 포함되어 있다(Goudie, 2009). 특히 "Fe"는 HNLC(High Nutrients Low Chlorophyll)해역에서 식물플랑크톤 생산력을 조절하는 주요 요인으로, 일부 해역에서는 해양의 철 유입원의 95%가 대기로부터 유입됨을 보고하였다(Duce et al., 1980; Duce and Tindale, 1991; Jickells and Spokes, 2001). 이처럼 황사내의 다양한 성분이 해양으로 유입되었을 경우 식물플랑크톤 성장에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

황사에 대한 연구는 황사발원지 및 이동경로 시뮬레이션에 관한 것이 주로 이루어졌고(Yoon, 1990; Kotamathi and Carmichael, 1993; Chun et al., 2001; Kim, 2008), 최근 황사에 관한 연구는 대부분 대기 에어로졸 및 대기성분, 광학적 특성, 황사성분의 크기와 대기수송 경로(Anderson et al., 2003; Kim et al., 2005; Mori et al., 2002; Park et al., 2005) 등으로 대기학적 관점에서 접근하는 연구들이 대부분이다. 황사가 해양생태계에 미치는 연구로는 황사발생시 강한 바람(dust storm)에 의해 수직혼합작용이 미치는 영향(Grobbelaar, 1994;

Miller et al., 2008)와 대기황사성분의 유입으로 인해 식물플랑크톤 생물량 및 생산력에 미치는 영향(Jickells and Sopkes, 2001; Ridgwell, 2003; Jo et al., 2007; Han et al., 2008) 등이 보고되었으나, 중국황사의 영향을 직접적으로 받는 국내에서는 황사가 해양으로 유입될 경우 해양생태계에 미치는 영향 연구가 극히 부족하다(Jo et al., 2007). 따라서 본 연구는 1) 황사발생시기에 현장에서의 해양환경변화와 식물플랑크톤 군집조성 및 일차생산력변화를 파악하고, 2) 배양실험을 통해 황사분진이 일차생산력에 미치는 영향을 파악하여 3) 실제 황사발생에 따른 현장에서의 일차생산력변동과 황사가 일차생산력에 미칠 수 있는 잠재적인 영향을 이해하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 현장조사

조사 정점(126°00.203'E, 36°51.308'N)은 인근 육상의 영향을 비교적 덜 받는 해역으로, 수심은 약 50 m 정도로 황해 평균 수심인 44 m(최대 100 m)보다 다소 깊게 측정되었다(Fig. 1). 조사 시기는 2006년 황사가 황해에 영향을 미친 시기 중 황사발생 직전인 4월 22일(before y.d.), 황사발생 중인 4월 24일(occurrence of y.d.), 황사발생 후인 4월 26일(after y.d.)에 태안반도 서쪽 인근해역에서 연구를 수행하였다. 황사 발생 전·중·후에 조사해역의 해양환경요인으로는 수중광량, 수온, 염분 등을 조사하였고, 식물플랑크톤 현존량은 Niskin채수기로 표층 해수 500 ml을 채수한 후, 폴리에틸렌병에 넣고 루골용액으로 고정하였다. 고정된 시료는 침전법을 이용하여 20 ml로 농축 후, Sedgwick-Rafter chamber를 이용하여 계수하였다. Chlorophyll *a*(Chl-*a*)는 현장해수 300 ml을 여과지(47 mm GF/F, Whatman)에 여과한 후, 여과지에 90% 아세톤용액 10 ml을 넣고 24시간 동안 냉암소 상태에서 보관 후 추출하였다. 추출된 시료는 형광분석기(Turner design, 10-AU)를 이용하여 측정하였고, 측정된 자료는 Parsons et al.(1984)의 계산식을 이용하여 분석하였다. 일차생산력 측정은 인공광 구배를 이용한 C-14 배양방법을 사용하였고, 처리된 시료는 훈증(fuming) 후 섬광 계수기(RackBeta II Scintillation Counter)로 분당붕괴수(dpm)를 측정하였다. 배양 실험을 통해 얻어진 결과를 이용하여 P-I 모델에 비선형 회귀법으로 적합화하여(Press et al., 1986) 매개변수들을 구하였고, P-I 실험에서 얻어진 결과는 Platt et al.(1980)의 모형에 적합화하여 매개변수화 하였다. 일일 일차생산력은 P-I 매개변수를 Chl-*a*, 광량, 유폴대 깊이 등과 결합하여 구하였다.

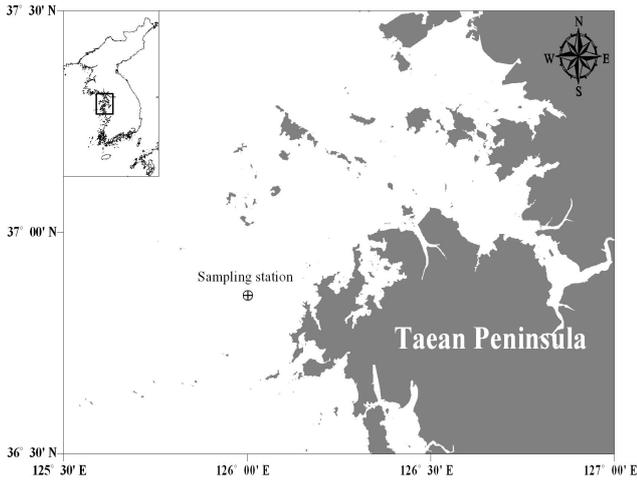


Fig. 1. Map showing the sampling station in the coastal area of the Yellow Sea, Korea.

2.2 황사영향 실험

황사가 발생한 2006년 4월 24일에 high volume air sampler (Sibata HV-500F, 500 L·s⁻¹)로 두 시간동안 채집된 황사 여과지(Whatman 934-AH, GF/F, 110 mm)를 현장여과해수(0.2 μm, membrane filter, Millipore) 500 ml에 넣고, sonicator(화신테크, POWERSONIC 405)로 30분 동안 작동하여 여과지로부터 황사(60 mg·L⁻¹)를 분리하였다. 황사 농도에 따른 영향을 알아보기 위해 추출된 황사용액을 황사발생 전 채수한 해수와 희석하였고, 최종 농도가 각각 0 ppm(control), 6 ppm, 12 ppm, 18 ppm이 되도록 혼합하여 일차생산력을 측정하였다. 또한 황사 투여 후, 시간에 따른 일차생산력 변화 실험은 현장 해수수온인 6°C, 염분은 31.7, 광량은 80 μE·m⁻²·s⁻¹, light : dark = 12 : 12의 배양조건에서 황사 추출액을 첨가한 실험구(test: 1.5 ppm)와 첨가하지 않은 대조구(control; 0 ppm)를 48시간 동안 배양하였다. 황사분진 첨가 직후(T0)와 배양 48시간 이후(T48)의 실험구(test)와 대조구(control)에서의 식물플랑크톤 일차생산력 및 최대 동화계수(P^B_m) 변화를 파악하였다.

3. 결과

3.1 현장연구

Table 1에 황사발생기간 동안의 해양환경변화와 식물플랑크톤 현존량 및 생물량(Chl-*a*)변화 등을 나타내었다. 황사발생 전에는 표·저층간의 수온이 6.9°C에서 5.9°C로 약 1°C 정도 차이를 보였으나, 상대적으로 높은 수온을 보인 표층 해수가 황사발생 후 활발한 수직혼합작용으로 인해 황사발생

중과 후로 갈수록 수온분포가 수직적으로 균일하게 나타났고, 평균 수온은 황사발생 전보다 후로 갈수록 증가하였다(Fig. 2a). 반면 염분변화는 황사발생기간 동안에 수직분포에 큰 차이를 보이지 않아, 조사기간 동안에 인근 육상으로부터 담수유입의 영향이 크게 나타나지 않았다(Fig. 2b). 일일 광량은 황사발생 전과 중보다 후에 약 63%가 감소하였고, 수괴내의 수직소광계수(K_{PAR})는 0.39 m⁻¹에서 1.29 m⁻¹으로 약 3배 이상 증가되어 황사발생 전과 중의 유평대 깊이가 8~10 m에서 황사발생 후에 4~5 m로 약 50%가 감소하였다(Table 1, Fig. 2c, 2d, Fig. 6a).

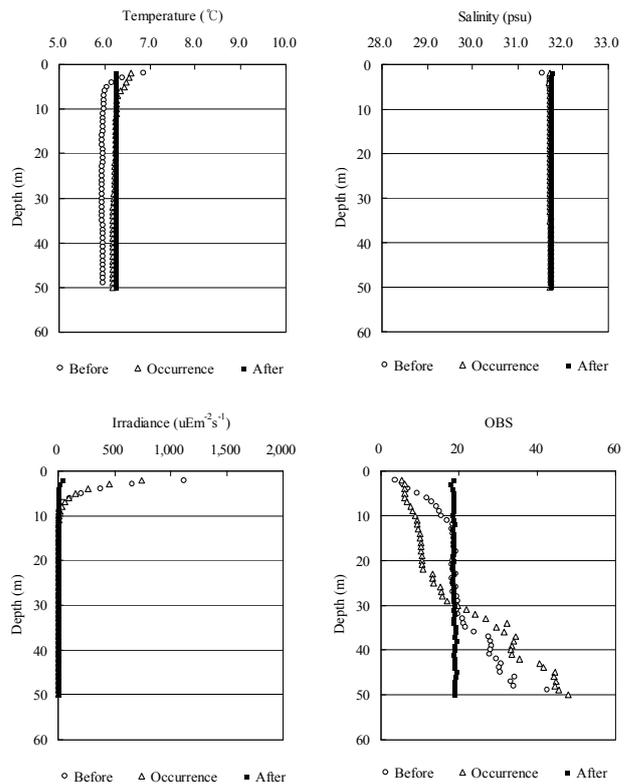


Fig. 2. Vertical distributions of temperature (a), salinity (b), irradiance (c) and turbidity (d) in the coastal area of the Yellow Sea during the study period.

조사기간 중 식물플랑크톤 군집조성은 돌말류(diatoms)와 와편모조류(dinoflagellates)가 주요 출현그룹으로 나타났고(Fig. 3), 특히 가장 높은 조성비를 나타낸 돌말류는 황사발생 전(72%)보다 중(81%)과 후(87%)에 군집조성비가 점차 증가하였으며, 식물플랑크톤 현존량에서도 돌말류의 증가가 두드러지게 나타났다(Fig. 4). 또한 돌말류의 조성비 및 현존

태안반도주변에서 춘계 황사 전·후 식물플랑크톤 반응특성과 황사분진 영향평가

량이 증가하면서 식물플랑크톤의 다양성지수는 1.83에서 1.57로 점차 감소하여 식물플랑크톤 군집이 점차 단순화되는 경향을 보였다(Table 1). 식물플랑크톤의 생물량을 나타내는 Chl-*a* 농도는 황사발생기간 동안 1 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 미만으로 전반적으로 매우 낮은 농도를 보였고, 황사발생 전 저조에서 고조기까지의 Chl-*a* 농도 연속관측결과가 0.3~0.6 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 의 범위로 평균 0.5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 로 나타나 황사중과 후로 갈수록 Chl-*a* 농도가 각각 0.7 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 과 0.9 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 로 증가하는 경향을 보였다(Fig. 5). 식물플랑크톤 우점종은 황사발생 전에 unid. flagellates (미동정 편모류)와 cryptomonads가 주요 우점종으로 출현하였고, 황사발생 중과 후에는 저서성 돌말류(benthic-diatoms)인 *Paralia sulcata*가 주요 우점종으로 출현하여 황사발생 시기에 따라 식물플랑크톤 우점종의 차이를 보였다(Table 2). 최대 동화계수(P_m^B)는 황사발생 전에서 후로 갈수록 다소 감소하였으며, 일차생산력도 황사발생 전과 중보다 황사발생 후에 감소하였다(Fig. 6b).

Table 1. The changes of abiotic and biotic parameters in the coastal area of the Yellow Sea during the study period (mean \pm sd)

Parameters	22 April (before)	24 April (occurrence)	26 April (after)
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	5.99 \pm 0.15	6.24 \pm 0.09	6.24 \pm 0.00
Salinity	31.73 \pm 0.03	31.72 \pm 0.01	31.73 \pm 0.00
Chlorophyll <i>a</i> ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.5 \pm 0.1	0.7	0.9
Diversity index (<i>H'</i>)	1.83	1.66	1.57
Mean of daily light (PAR) ($\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	772.7	800.9	287.4
Euphotic depth (m)	8~9	9~10	4~5
Vertical extinction coefficient (K_{PAR}) (m^{-1})	0.39	0.52	1.29
Standing crops ($\times 10^3$ cells $\cdot\text{L}^{-1}$)			
Phytoplankton	25.8	46.0	81.9
Diatoms	6.5	44.9	80.7
Dinoflagellates	1.5	0.6	n.d.*

*n.d. indicates no detection

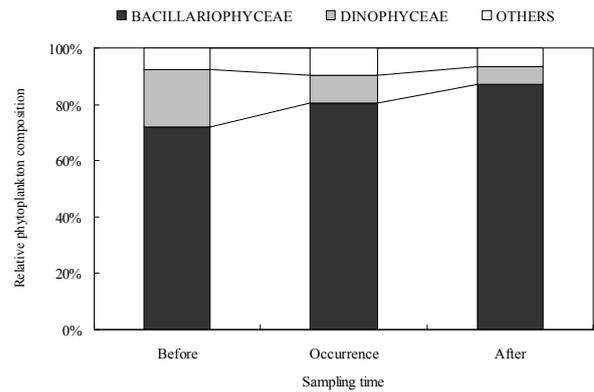


Fig. 3. The change of phytoplankton community in the coastal area of the Yellow Sea during the study period.

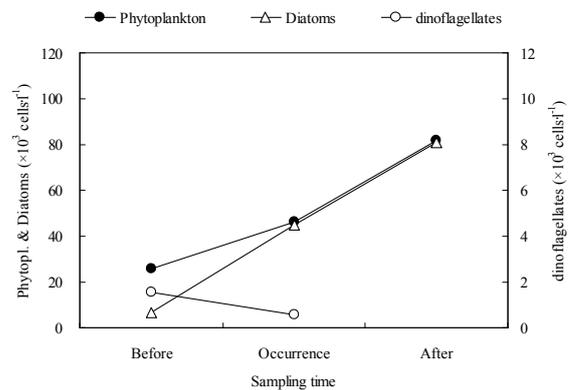


Fig. 4. The changes of phytoplankton, diatoms and dinoflagellates standing crops in the coastal area of the Yellow Sea during the study period.

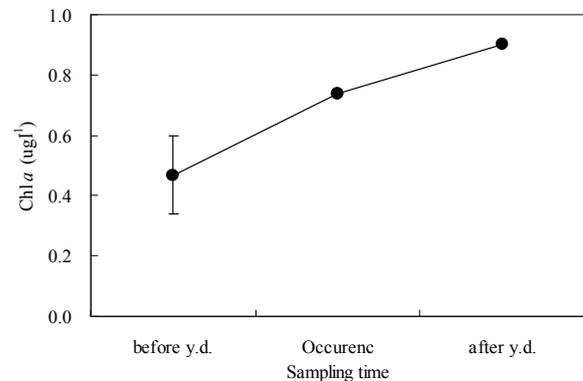


Fig. 5. The change of Chl-*a* concentration in the coastal area of the Yellow Sea during the study period. Error bar is min. and max.

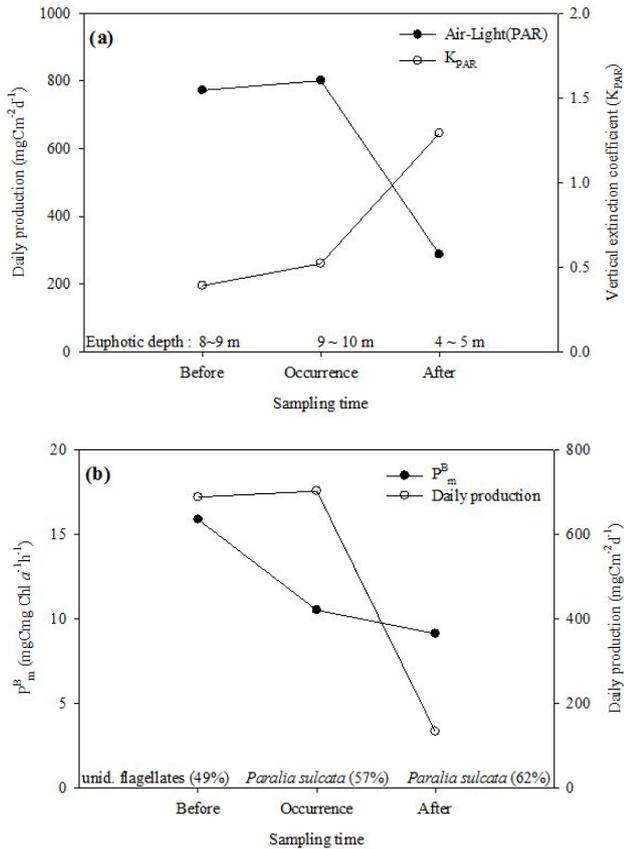


Fig. 6. The changes of (a) light condition (air-light, K_{PAR} and euphotic depth), (b) assimilation number (P_m^B), daily production and phytoplankton dominant species in the coastal area of the Yellow Sea during the study period.

3.2 황사영향 실험

황사분진 첨가에 따른 최대 동화계수(P_m^B)는 대조구(control)보다 낮았고, 황사분진 첨가농도가 증가함에 따라 점차 감소하였다(Fig. 7a). 특히 황사분진 첨가 1.5 ppm 실험구(test)에서 최대 동화계수(P_m^B)는 대조구보다 36%가 감소하여 황사분진 1.5 ppm 첨가만으로도 식물플랑크톤 일차생산력에 일시적인 저해효과를 주었다. 일차생산력도 최대 동화계수(P_m^B)와 같이 황사분진 첨가농도가 증가함에 따라 감소하였다(Fig. 7a). 그러나 황사첨가 후 48시간 동안의 배양실험에서는 최대 동화계수(P_m^B : 1.9 mgC Chl- a^{-1} h⁻¹)와 일차생산력(1.5 mgC m⁻³ h⁻¹) 모두 배양초기(T0)에는 황사첨가에 따른 영향으로 대조구보다 낮은 값을 보였으나, 황사첨가 48시간 후(T48)에는 대조구보다 황사첨가 실험구에서 최대 동화계수(P_m^B : 11.4 mgC Chl- a^{-1} h⁻¹)와 일차생산력(6.5 mgC m⁻³ h⁻¹)이 모두 높은 값을 보여 황사분진에 의한 잠재적 영향이 나타났다(Fig. 7b).

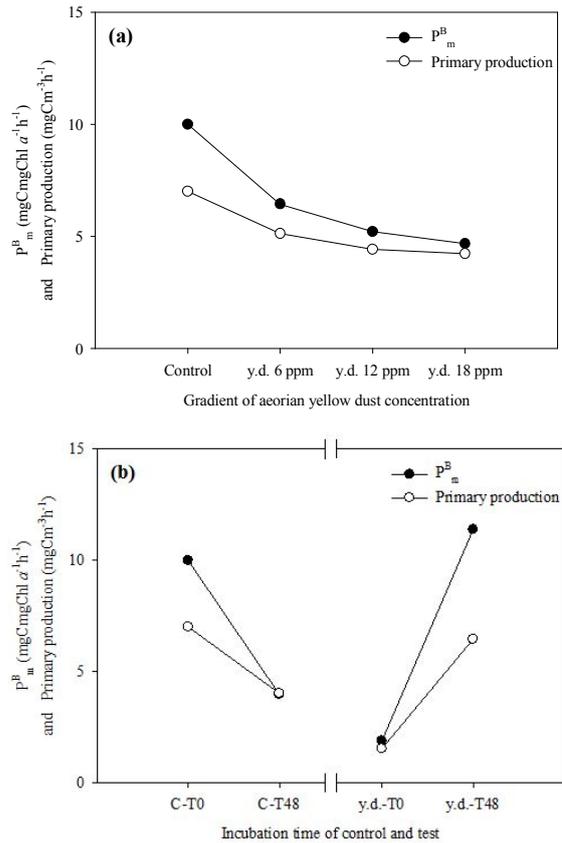


Fig. 7. The addition of aeolian yellow dust experiment using in-situ seawater and phytoplankton community for the variations of assimilation number (P_m^B) and primary productivity. (a) After the addition of aeolian yellow dust, assimilation number (P_m^B) and primary productivity influence by each aeolian yellow dust concentrations within 2 hours, and (b) incubation experiment for 48 hours.

4. 고찰

4.1 현장연구

서해에서 해양 식물플랑크톤 군집조성은 돌말류와 와편모류가 주요 그룹으로 출현하나(Zhang et al., 2016), 황사발생 시기에 따라 돌말류와 와편모조류는 군집조성에 차이를 보였다(Fig. 3~4).

저서미세조류(microphytobenthos)는 황사발생시 동반되는 강한 바람과 조석작용(조차: 3.4~5.7m)으로 인해 전체 미세조류군집의 80~90%를 차지하였다. 그 결과 수직혼합이 활발히 일어나는 해역에서 대표적으로 출현하는 저서성 돌말류(benthic diatoms)인 *Paralia sulcata*가 황사발생 시에 최대 62%의 우점종을 차지하였다(Choi and Shim, 1986). 반면 상대적으

태안반도주변에서 춘계 황사 전·후 식물플랑크톤 반응특성과 황사분진 영향평가

로 강한 흐름에 약한 와편모류는 황사발생시 점차 감소하였다(Smayda, 1970; Margalef, 1978; Mann, 1993; Carter et al., 2005). 또한 미동정 편모류와 cryptomonads도 안정적인 수괴가 형성된 황사발생 전에 주요 우점종으로 출현하였으나, 황사발생 시에는 우점종으로 출현하지 않았다(Table 2).

Table 2. The change of phytoplankton dominant species in the coastal area of the Yellow Sea during the study period

Sampling period	Species	Standing crops ($\times 10^3$ cells·L ⁻¹)	Dominant rate (%)
Before	unid. flagellates	12.7	49.3
	cryptomonads.	2.7	10.4
Occurrence	<i>Paralia sulcata</i>	26.2	57.0
	<i>Chaetoceros debilis</i>	4.7	10.1
After	<i>Paralia sulcata</i>	50.5	61.6

황사발생 중의 최대 동화계수(P^B_m)는 감소한 반면 일차생산력은 큰 변화를 나타내지 않았다. 이는 황사발생 중과 후에 상대적으로 낮은 최대동화계수(P^B_m)를 나타내는 *P. sulcata*가 57~62%의 범위로 우점하여 전체 식물플랑크톤의 최대 동화계수가 감소한 것으로 판단된다(Chung, 1996). 반면 생물량(Chl-*a*)은 저층의 저서미세조류가 수층으로 가입되어 증가하였고, 이로 인해 최대동화계수의 감소영향을 상쇄시켜 일차생산력의 변동폭을 감소시킨 것으로 판단된다(Fig. 6). 따라서 황사발생시 현장에서는 강한 바람과 조석작용으로 인한 활발한 수직혼합작용은 수층의 광조건 감소와 식물플랑크톤의 군집조성 및 생물량을 변화시켜 식물플랑크톤의 대사활동변화와 생리대개변수에 영향을 준 것으로 판단되며(Dunstan, 1973; Beardall and Morris, 1976; MacCaul and Platt, 1977; Harris, 1978; Harding et al., 1981; Côté and Platt, 1983), 특히 광 환경변화는 수층의 일차생산력을 결정짓는 주요 요소로 판단된다. 황사발생 후에는 식물플랑크톤의 생물량(Chl-*a*) 증가에 비해 최대동화계수(P^B_m)의 감소와 특히 유광대 깊이의 큰 감소가 수층의 일차생산력에 영향을 주었다. 이와 같이 본 조사에서는 황사발생 중 또는 후에 강한 바람과 조석작용으로 수층의 부유물질 농도와 수직소광계수가 크게 증가하였고, 이로 인해 수층의 광조건이 크게 감소하여 일차생산력을 제한하는 주요 요인으로 작용하였다.

4.2 황사영향 실험

황사분진 첨가 1.5 ppm 실험구에서 최대 동화계수(P^B_m)는 대조구보다 36%가 감소하여 황사첨가에 따라 식물플랑크톤

이 민감하게 반응하였고, 황사분진 첨가농도 증가에 따른 최대동화계수(P^B_m)와 일차생산력의 변동률은 각각 최대 53%와 40%로 지수적인 감소경향을 보였다. 48시간 배양실험에서도 초기(T0)의 황사첨가에 따른 최대 동화계수(P^B_m) 및 일차생산력이 감소하였으나, 황사첨가 48시간 후에는 최대 동화계수(P^B_m)와 일차생산력이 다소 회복되는 경향을 보였다. 이는 황사첨가에 따른 황사분진 내의 다양한 무기영양염류 및 미량원소의 효과로 판단되나, 본 조사에서는 황사첨가에 따른 무기영양염류 및 미량원소의 변화를 판단하기에는 어려움이 있었다. 그러나 중국, 동해, 일본 등의 여러 선행 연구결과에서 황사분진내의 다양한 무기영양염류 및 미량원소가 일차생산력에 영향을 줄 수 있다고 보고하였고(Subba Rao et al., 1999; Bishop et al., 2002; Visser et al., 2003; Herut et al., 2005; Mikami et al., 2006; McTainsh and Strong, 2007; Han et al., 2007), 우리나라 동해해역에서는 춘계의 식물플랑크톤 대발생과 황사분진 내에 포함된 Fe성분이 식물플랑크톤의 일차생산력에 직·간접적으로 영향을 줄 수 있다고 보고하였다(Jo et al., 2007).

5. 결 론

주로 봄철에 고비사막과 중국북부 등에서 불어오는 황사는 강한 바람으로 수괴의 활발한 혼합작용이 이루어진다. 그 결과 비교적 수심이 얇은 황해에서는 *P. sulcata*와 같은 저서성 돌말류가 우점하고, 저층의 퇴적물 재부유로 인해 수괴전체가 높은 탁도를 보인다. 이러한 황사발생시 조사해역의 수층의 광환경변화와 식물플랑크톤 군집조성 및 생물량변화는 식물플랑크톤의 대사활동변화 및 생리학적 반응에 영향을 주어 최대 동화계수(P^B_m) 및 일차생산력을 변화시키고, 황사분진 실험에 의하면 황사 첨가농도 증가에 따라 최대 동화계수(P^B_m) 및 일차생산력은 일시적으로 감소하였다. 이와 같이 대기의 황사분진이 해양으로 유입될 경우 일시적인 저해효과를 가져올 것으로 판단되나, 황사분진 첨가 후 시간에 따른 변화에 의하면 황사분진 첨가 48시간(T48) 경과 후에는 대조구보다 황사분진 첨가 실험구에서 최대 동화계수(P^B_m) 및 일차생산력이 높게 나타나 황사분진 내의 다양한 무기영양염류 및 미량원소가 식물플랑크톤 성장에 긍정적인 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 황사발생시 서해연안에서는 강한 바람에 의한 mixing효과로 광환경과 식물플랑크톤 군집조성 및 생물량이 일차생산력을 변화시키는 주요 요소로 작용하나, 황사분진은 잠재적으로 식물플랑크톤의 성장을 촉진시킬 수 있는 가능성을 시사하였다. 다만, 황사성분 또는 분진에 의한 식물플랑크톤의 정량적인 영향은 추후 세밀한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 ‘황사가 해양환경에 미치는 영향 연구 (PM45500)’와 국립수산과학원 과제인 ‘환경변화에 따른 하구 생태계 모니터링 (R2018050)’의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Alpert, P., J. Herman, Y. J. Kaufman and I. Carmona(2000), Response of the climatic temperature to dust forcing, inferred from total ozone mapping spectrometer (TOMS) aerosol index and the NASA assimilation model, *Atmospheric Research*, Vol. 53, No. 1, pp. 3-14.
- [2] Anderson, T. L., S. J. Masonis, D. S. Covert, N. C. Ahlquist, S. G. Howell, A. D. Clarke and C. S. McNaughton(2003), Variability of aerosol optical properties derived from in situ aircraft measurements during ACE-Asia, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 108, No. D23, 8647, doi:10.1029/2002JD003247.
- [3] Andreae, M. O.(1995), Climatic effects of changing atmospheric aerosol levels. In: Henderson-Sellers, A. (Ed.), *World survey of climatology, Future climates of the world*, Vol. 16, Elsevier, Amsterdam, pp. 341-392.
- [4] Beardall, J. and I. Morris(1976), The concept of light intensity adaptation in marine phytoplankton: Some experiments with *Phaeodactylum tricornutum*, *Marine Biology*, Vol. 37, No. 4, pp. 377-387.
- [5] Bishop, J. K. B., R. E. Davis and J. T. Sherman(2002), Robotic observations of dust storm enhancement of carbon biomass in the North Pacific, *Science*, Vol. 298, No. 5594, pp. 817-821.
- [6] Côté, B. and T. Platt(1983), Day-to-day variations in the spring-summer photosynthetic parameters of coastal marine phytoplankton, *Limnology and Oceanography*, Vol. 28, No. 2, pp. 320-344.
- [7] Carter, C. M., A. H. Ross, D. R. Schiel, C. Howard-Williams and B. Hayden(2005), In situ microcosm experiments on the influence of nitrate and light on phytoplankton community composition, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 326, No. 1, pp. 1-13.
- [8] Choi, J. K. and J. H. Shim(1986), The ecological study of phytoplankton in Kyeonggi Bay, Yellow Sea. III. Phytoplankton composition, standing crops, tychoplagic plankton, *J. Oceanol. Soc. Kor.*, Vol. 21, No. 3, pp. 156-170.
- [9] Chun, Y., K. O. Boo, J. Kim, S. U. Park and M. Lee(2001), Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 106, No. D16, pp. 18461-18469.
- [10] Chung, K. H.(1996), Deterministic factors of the marine basal production in the coastal waters of Korea, Ph.D Thesis, Inha University Incheon, p. 191.
- [11] Duce, R.(1995), Sources, distributions, and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate Vol. 17, pp. 43-72.
- [12] Duce, R. A. and N. W. Tindale(1991), Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean, *Limnology and Oceanography*, Vol. 36, No. 8, pp. 1715-1726.
- [13] Duce, R. A., C. K. Unni, B. J. Ray, J. M. Prospero and J. T. Merrill(1980), Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: temporal variability, *Science*, Vol. 209, No. 4464, pp. 1522-1524.
- [14] Dunstan, W. M.(1973), A comparison of the photosynthesis - light intensity relationship in phylogenetically different marine microalgae, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 13, No. 3, pp. 181-187.
- [15] GESAMP(1989), group of experts on scientific aspects of mairne pollution, working group 14, The atmospheric input of trace species to the world ocean, rep. stud., *World Meteorol. Organ. Geneva.*, Vol. 38, p. 106.
- [16] Goudie, A. S.(2009), Dust storms: Recent developments, *Journal of Environmental Management*, Vol. 90, No. 1, pp. 89-94.
- [17] Grobbelaar, J. U.(1994), Turbulence in mass algal cultures and the role of light/dark fluctuations, *Journal of Applied Phycology*, Vol. 6, No. 3, pp. 331-335.
- [18] Han, L., G. Zhuang, S. Cheng and J. Li(2007), The mineral aerosol and its impact on urban pollution aerosols over Beijing, China, *Atmospheric Environment*, Vol. 41, No. 35, pp. 7533-7546.
- [19] Han, Y., X. Fang, T. Zhao and S. Kang(2008), Long range trans-Pacific transport and deposition of Asian dust aerosols, *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 20, No. 4, pp. 424-428.
- [20] Harding, L. W., B. W. Meeson, B. B. Prézelin and B. M. Sweeney(1981), Diel periodicity of photosynthesis in marine phytoplankton, *Marine Biology*, Vol. 61, No. 2, pp. 95-105.
- [21] Harris, G. P.(1978), Photosynthesis productivity and growth: The physiological ecology of phytoplankton, *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergeb. Limnol.*, Vol. 10, pp. 1-17.

- [22] Herut, B., T. Zohary, M. D. Krom, R. F. C. Mantoura, P. Pitta, S. Psarra, F. Rassoulzadegan, T. Tanaka and T. Frede Thingstad(2005), Response of East Mediterranean surface water to Saharan dust: On-board microcosm experiment and field observations, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, Vol. 52, No. 22, pp. 3024-3040.
- [23] IPCC(2001), *Climate change: The scientific basis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 83.
- [24] Jickells, T. D. and L. J. Spokes(2001), Atmospheric iron inputs to the oceans, Chapter 4. In: Turner, D., Hunter, K.A. (Ed.), *The biogeochemistry of iron in seawater*, Wiley, pp. 85.
- [25] Jo, C. O., J. Y. Lee, K. A. Park, Y. H. Kim and K. R. Kim(2007), Asian dust initiated early spring bloom in the northern East/Japan Sea, *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, No. 5, L05602, doi:10.1029/2006GL027395.
- [26] Kim, J.(2008), Transport routes and source regions of Asian dust observed in Korea during the past 40 years (1965-2004), *Atmospheric Environment*, Vol. 42, No. 19, pp. 4778-4789.
- [27] Kim, S. W., S. C. Yoon, A. Jefferson, J. A. Ogren, E. G. Dutton, J. G. Won, Y. S. Ghim, B. I. Lee and J. S. Han(2005), Aerosol optical, chemical and physical properties at Gosan, Korea during Asian dust and pollution episodes in 2001, *Atmospheric Environment*, Vol. 39, No. 1, pp. 39-50.
- [28] Kotamarthi, V. R. and G. R. Carmichael(1993), A modeling study of the long-range transport of Kosa using particle trajectory methods, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, Vol. 45, No. 5, pp. 426-441.
- [29] Laurent, B., B. Marticorena, G. Bergametti, P. Chazette, F. Maignan and C. Schmechtig(2005), Simulation of the mineral dust emission frequencies from desert areas of China and Mongolia using an aerodynamic roughness length map derived from the POLDER/ADEOS 1 surface products, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 110, No. D18, D18S04, doi:10.1029/2004JD005013.
- [30] Lin, T. H.(2001), Long-range transport of yellow sand to Taiwan in Spring 2000: observed evidence and simulation, *Atmospheric Environment*, Vol. 35, No. 34, pp. 5873-5882.
- [31] MacCaull, W. A. and T. Platt(1977), Diel variations in the photosynthetic parameters of coastal marine phytoplankton, *Limnology and Oceanography*, Vol. 22, No. 4, pp. 723-731.
- [32] Mann, K. H.(1993), Physical oceanography, food chains, and fish stocks: a review, *ICES Journal of Marine Science*, Vol. 50, No. 2, pp. 105-119.
- [33] Margalef, R.(1978), Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment, *Oceanologica Acta*, Vol. 1, No. 4, pp. 439-509.
- [34] McTainsh, G. and C. Strong(2007), The role of aeolian dust in ecosystems, *Geomorphology*, Vol. 89, No. 1, pp. 39-54.
- [35] Mikami, M., G. Y. Shi, I. Uno, S. Yabuki, Y. Iwasaka, M. Yasui, T. Aoki, T. Y. Tanaka, Y. Kurosaki, K. Masuda, A. Uchiyama, A. Matsuki, T. Sakai, T. Takemi, M. Nakawo, N. Seino, M. Ishizuka, S. Satake, K. Fujita, Y. Hara, K. Kai, S. Kanayama, M. Hayashi, M. Du, Y. Kanai, Y. Yamada, X. Y. Zhang, Z. Shen, H. Zhou, O. Abe, T. Nagai, Y. Tsutsumi, M. Chiba and J. Suzuki(2006), Aeolian dust experiment on climate impact: An overview of Japan-China joint project ADEC, *Global and Planetary Change*, Vol. 52, No. 1, pp. 142-172.
- [36] Miller, S. D., A. P. Kuciauskas, M. Liu, Q. Ji, J. S. Reid, D. W. Breed, A. L. Walker and A. A. Mandoos(2008), Haboob dust storms of the southern Arabian Peninsula, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 113, No. D1, D01202, doi:10.1029/2007JD008550
- [37] Mori, I., M. Nishikawa, H. Quan and M. Morita(2002), Estimation of the concentration and chemical composition of kosa aerosols at their origin, *Atmospheric Environment*, Vol. 36, No. 29, pp. 4569-4575.
- [38] Park, S. U., L. S. Chang and E. H. Lee(2005), Direct radiative forcing due to aerosols in East Asia during a Hwangsa (Asian dust) event observed on 19-23 March 2002 in Korea, *Atmospheric Environment*, Vol. 39, No. 14, pp. 2593-2606.
- [39] Parsons, T. R., Y. Maita and C. M. Lalli(1984), *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*, Pergamon press, Oxford, p. 173.
- [40] Platt, T., C. L. Gallegos and W. G. Harrison(1980), Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton, *Journal of Marine Research*, Vol. 38, pp. 687-701.
- [41] Press, W. H., B. P. Flannery, S. A. Teukolsky and W. T. Vetterling(1986), *Numerical recipes*, Cambridge university press, p. 1256.
- [42] Ridgwell, A. J.(2003), Implications of the glacial CO₂ "iron hypothesis" for quaternary climate change, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 4, No. 9, 1076, doi:10.1029/2003GC000563.
- [43] Shine, K. P. and P. M. d. F. Forster(1999), The effect of human activity on radiative forcing of climate change: a review of recent developments, *Global and Planetary Change*,

Vol. 20, No. 4, pp. 205-225.

- [44] Smayda, J. J.(1970), The suspension and sinking of phytoplankton in the sea, *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, Vol. 8, pp. 353-414.
- [45] Sokolik, I. N., D. M. Winker, G. Bergametti, D. A. Gillette, G. Carmichael, Y. J. Kaufman, L. Gomes, L. Schuetz and J. E. Penner(2001), Introduction to special section: Outstanding problems in quantifying the radiative impacts of mineral dust, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 106, No. D16, pp. 18015-18027.
- [46] Subba Rao, D. V., F. Al-Yamani and C. V. Nageswara Rao(1999), Eolian dust affects phytoplankton in the waters off Kuwait, the Arabian Gulf, *Naturwissenschaften*, Vol. 86, No. 11, pp. 525-529.
- [47] Visser, F., L. J. A. Gerringa, S. J. Van der gaast, H. J. W. De baar and K. R. Timmermans(2003), The role of the reactivity and content of iron of aerosol dust on growth rates of two antarctic diatom species, *Journal of Phycology*, Vol. 39, No. 6, pp. 1085-1094.
- [48] Yoon, Y. H.(1990), On the yellow sand transported to the Korean peninsula, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 26, No. 2, pp. 111-120.
- [49] Zhang, S., X. Leng, Y. Feng, C. Ding, Y. Yang, J. Wang, H. Wang and J. Sun(2016), Ecological provinces of spring phytoplankton in the Yellow Sea: species composition, *Acta Oceanologica Sinica*, Vol. 35, No. 8, pp. 114-125.
- [50] Zhang, X. Y., R. Arimoto and Z. S. An(1997), Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 102, No. D23, pp. 28041-28047.
- [51] Zhang, X. Y., R. Arimoto and Z. S. An(1999), Glacial and interglacial patterns for Asian dust transport, *Quaternary Science Reviews*, Vol. 18, No. 6, pp. 811-819.

Received : 2018. 10. 29.

Revised : 2018. 12. 03.

Accepted : 2018. 12. 28.