

조류 성장 억제를 위한 녹조 및 적조 발생과 황사의 상관관계 초기적 연구

김태진^{1*}, 정재철¹, 서라벌¹, 김형모², 김대근³, 전영신⁴, 박순웅⁵, 이세윤⁶, 박준조⁷, 이진하⁸, 이재정⁹, 이은주¹⁰

An Initiative Study on Relationship between Algal Blooms and Asian Dust for Regulation of Algal Blooms

Tai-Jin Kim^{1*}, Jaechil Jeong¹, Rabeol Seo¹, Hyung Moh Kim², Dae Geun Kim³, Youngsin Chun⁴, Soon-Ung Park⁵, Sehyoon Yi⁶, Jun Jo Park⁷, Jin Ha Lee⁸, Jay J. Lee⁹, and Eun Ju Lee¹⁰

접수: 2014년 7월 10일 / 게재승인: 2014년 8월 13일

© 2014 The Korean Society for Biotechnology and Bioengineering

¹수원대학교 화학공학과

¹Department of Chemical Engineering, University of Suwon
Fax: +82-31-220-2528

e-mail: tjkim@suwon.ac.kr

²(주)장수채 부설연구소

²Research Institute, Jangsuechae Co., Ltd.

³전북대학교 생물공정공학과

³Department of Bioprocess Engineering, Chonbuk National University

⁴국립기상연구소 황사연구과

⁴Asian Dust Research Lab, National Institute of Meteorological Research

⁵서울대학교 대기환경모델링센터

⁵Center for Atmospheric and Environmental Modeling, Seoul National University

⁶수원대학교 화학과

⁶Department of Chemistry, University of Suwon

⁷한라산업개발

⁷Halla Energy & Environment

⁸동남보건대 바이오환경과

⁸Department of Bio & Environmental Science, Dongnam Health College

⁹국립환경과학원 금강물환경연구소

⁹Geum River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

¹⁰서울대학교 생명과학부

¹⁰School of Biological Sciences, Seoul National University

Abstract: Although the problems of the algal blooms have been world-widely observed in freshwater, estuary, and marine throughout the year, it is not yet certain what are the basic causes of such blooms. Consequently, it is very difficult to predict when and where algal blooms occur. The constituents of the Asian dust are in a good agreement with the elements required for the algal growth, which suggests some possible relationship between the algal blooms and the Asian dust. There have been frequently algal blooms in drinking water from rivers or lakes. However, there is no any algal blooms in upwelling waters where the Asian dust cannot penetrate into the soil due to its relatively weak settling velocity (size of particles, $4.5 \pm 1.5 \mu\text{m}$), which implies the possible close relationship of the Asian dust with algal blooms. The present initiative study is thus intended firstly in Korea to illustrate such a relationship by reviewing typical previous studies along with 12 years of weekly iron profiles (2001~2012) and two slant culture experiments with the dissolved Asian dust. The result showed bacterial suspected colonies in the slant culture experiment that are qualitatively in a good agreement with the recent Japanese studies. Since the diatoms require cheap energy (8%) compared to other phytoplankton (100%) to synthesize their cell walls by silicate, the present results can be used to predict algal blooms by diatoms if the concentrations of iron and silicate are available during spring and fall. It can be postulated that the algal blooms occur only if the environmental factors such as light, nutrients, calm water surface layer, temperature, and pH are

simultaneously satisfied with the requirements of the micro-nutrients of mineral ions supplied by the Asian dust as enzymatic cofactors for the rapid bio-synthesis of the macromolecules during algal blooms. Simple eco-friendly methods to regulate the algal blooms are suggested for the initial stage of blooming with limited area: 1) to cover up the water surface with black curtain and inhibit photosynthesis during the day time, 2) to blow air (20.9%) or pure oxygen into the bottom of the water and inhibit rubisco for carbon uptake and nitrate reductase for nitrogen uptake activities in algal growth during the night, 3) to eliminate the resting spores or cysts by suction of bottom sediments as deep as 5 cm to prevent the next year germinations.

Keywords: Algal blooms, Asian dust, Mineral, Enzyme, Photosynthesis, Regulation

1. INTRODUCTION

매년 여름마다 찾아오는 녹조와 적조가 강과 바다에 악영향을 끼치고 있다. 언제, 어디에서 그러한 녹조나 적조가 발생하는가에 대한 예측은 국내외의 수많은 그간의 연구에도 불구하고 명확한 해답을 갖고 있지 못하다. 최근 자료에 의하면, 벌써부터 영산강과 낙동강은 녹조 비상이 걸린 상태다. 낮 최고 기온이 30도에 육박하는 등 이른 더위의 한국 상륙 때문이다. 전남도에 따르면 갈수기(1~3월)가 지나고 본격적인 무더위를 앞둔 영산강과 낙동강에서 녹조류 농도가 급상승하고 있다. ‘관심’ 기준치 (70 mg/m^3)에는 아직 미치지 못하지만 예년 $20\sim 30 \text{ mg/m}^3$ 보다는 높은 수준이라는 설명이다. 경남 통영과 거제 등 남해안의 적조 발생 예상 시기가 예년보다 당겨질 것으로 전망이 되면서 양식어민들의 불안감은 높아지고 있다. 국립수산물과학원은 최근 남해안의 고수온이 계속되고 있어 올해 유해성 적조가 전년보다 10여일 정도 빠른 7월 초에 발생하였다고 밝혔다. 지난 2013년 경우 유해성 적조생물인 코클로디니움(Coelodinium)이 7월 17일 통영과 여수 앞바다에서 처음 발생했다 [1]. 국내에서 녹조현상 (green tide)이라는 말은 1996년 들어 처음 사용되었는데 연안의 해수가 붉게 변하는 적조현상 (red tide)과 대비하여 하천이나 호소 등의 물 색깔이 녹색으로 변한다고 하여 신문이나 방송 등을 통해 붙여진 이름이다. 그러나 실제 녹조현상을 일으키는 원인 조류들은 대부분 남조류 (cyanobacteria)로 학문적으로 정확한 표현이라고는 할 수 없으나 일반인들이 쉽게 이해할 수 있는 표현이기 때문에 일반적으로 사용되어 오면서 새로운 용어로서의 위치를 자리잡아 가고 있다. 우리나라에서는 1970년대 산업화 이후 배출오염원의 증가로 많은 호수와 하천들이 오염되었는데, 이러한 오염 현상이 더욱 심화되면서 근래에 와서 조류의 대발생 등의 부영양화 현상도 빈번히 발생하여 사회 문제화 되고 있다 [2].

황사는 아시아 대륙의 몽골과 중국의 사막지역, 황하 중류

의 건조지대, 황토고원, 내몽골고원에서 한랭전선의 후면에서 부는 강한 바람이나 지형에 의해 만들어진 난류로 인하여 다량의 흙먼지가 공중으로 떠올라 바람을 타고 이동하면서 지표에 천천히 떨어지는 현상이다. 이와 같은 먼지현상은 사막이나 건조한 곳에서 잘 나타나며 아시아 대륙에서 생기는 것을 황사 (Asian dust, Hwangsa)라 한다. 예로부터 우리나라에서는 흙먼지가 떨어지는 현상을 토우라 하였으며 [3], 국립국어원의 표준국어대사전에도 흙비를 “바람에 날려 올라갔던 모래흙이 비처럼 떨어지는 것”으로 정의하고 있다. 이와 같이 황사는 연례적으로 예외없이 발생하고 다만 년도에 따라 발생빈도 정도만 다르다. 연례적으로 발생하는 황사는 입자직경 $4.5\pm 1.5 \mu\text{m}$ 가 대부분인 것으로 주요 성분은 Fe, Al, Si, K, Ca, Mn, Ti, Mg 등이 있다 [4-6].

호수에서 녹조, 바다연안에서 적조의 발생은, 햇빛세기, 영양염류, 안정한 수온 약층, 대기 온도 또는 수온 (적조 $24\pm 1^\circ\text{C}$, 녹조 25°C 이상), 강우량, pH, 미량 금속 및 원소 (Ca, Mg, Na, Cu, K, N, P, Cl, S, Si, Mo, Mn, Zn, Co, V, Br, I) 등이 동시에 합치할 때 발생하게 된다. 여기서 햇빛세기, 안정한 수온 약층, 대기 온도 또는 수온, 강우량, pH 등은 자연현상에 의하여 결정되는 환경적 요소인데 반하여 영양염류 및 미량의 금속 및 원소의 요소는 외부의 유입량에 따라 그 수준이 결정된다. 또한, 영양염류 및 미량의 금속 및 원소는 토양 등지에서 강우에 의하여 씻겨 호소 및 바다 연안으로 유입되어 녹조 및 적조 발생에 있어서 영양염류 및 미량의 금속 및 원소를 공급하는 공급원이 된다 [7]. 현재 하천의 조류 정보는, chlorophyll- α 의 농도가 25 mg/m^3 이고 동시에 조류 (남조류) 농도가 $5,000 \text{ cells/ml}$ 모두 2회 이상일 때에 발령된다. 한편, 해상의 “적조 주의보”는 코클로디니움인 경우에 100 cells/ml 일 때 발령하고, $1,000 \text{ cells/ml}$ 일 때는 “적조 경보”를 각각 발령한다. 이런 “주의보”나 “경보”를 발령되었을 때만이 적조 보험에 의하여 피해 보상을 받게 된다. 피해 보상금은 수협에서 지급되고, 수협의 보상금은 정부에서 일부 지원해주고 있다. 따라서 적조가 발생되면 궁극적으로 정부 지원금이 지급되고 물고기의 폐사로 인하여 양식업자의 피해가 크다. 따라서 시기 적절한 적조 및 녹조예보를 주간, 일간 등으로 개괄적이거나 일기 예보 식으로 미리 예보함으로써 사전에 녹조나 적조 피해를 예방할 필요가 크다. 녹조의 경우에 사전 예보를 통하여, 하천이나 호수의 물을 녹조 발생 이전에 취수하여서 녹조가 발생하는 유해 독소나 이취미, 2-MIB, 지오스민 등을 피할 수 있다. 더불어 취수 속에 녹조가 있음으로 인하여 발생하는 취수 유입 시설의 손상을 사전에 방지 가능한 이점이 있다. 조류영향을 최소화하기 위하여 통상적으로 부레옥잠 재배, 황토 살포, 조류제거선 가동, 심층수 취수, 오존처리, 활성탄 흡착, 차광막 설치, 수중 포기시설, 오염총량 관리제도를 사용하여 왔다 [2]. 적조의 경우에, 사전에 적조발생 가능성을 적조 예보를 통하여 알게 된다면 물고기를 가능한 하층부에서 생활하도록 유도하여 적조 발생 시에 적조 생물이 광합성이 일어나는 낮 동안 주로 생활하는 표층을 피하여 4 m 공간 이하 [7]에서 물고기를 양식함으로써, 적조 생물이 순간

적으로 증식할 때 표층수의 용존 산소를 고갈시킴으로 인하여 적조 생물이 죽게 되어 표층수를 덮음으로써 햇빛을 차단하게 되어 표층수 밑에서 생활하는 물고기들이 산소부족으로 인하여 표층수로 올라오다가 아가미를 통하여 호흡하는 과정에서, 코크로디니움의 끈적거리는 점액물질 (extracellular polymeric substances, mucilage)이 외벽을 구성하는 까닭에 이들이 물고기의 아가미에 들어붙어서 산소전달을 차단함으로 인하여, 결국은 물고기가 질식사하여 죽는 일이 발생한다. 따라서 적조를 사전에 경보하여 적조 생물이 낮에 주로 활동하는 표층수로부터 4 m 아래로 피하여 그 곳에서 물고기들이 생활하도록 이중 거물망 같은 것으로 물고기 이동 공간을 제한함으로써, 물고기들이 적조 생물과의 직접적 접촉을 피하게 하여, 물고기의 폐사를 최소화할 수 있다. 우리나라 적조 피해의 주된 원인 코크로디니움은 밤이 되면 바다 밑으로 이동하므로 이때에는 양식어장 그물 구조를 상하식 이중으로 구성하여 상층부로 물고기를 신속하게 이동시켜, 물고기들의 적조생물 접촉시간을 최소화한다. 이와 같이 적조 생물이 활동하는 낮 시간 동안에는 물고기들을 4 m 이하 수면에서 키우다가 해가 떨어진 밤이 되어서 적조 생물이 해안 바닥으로 이동할 때에는 신속히 물고기들을 표층수 주위로 이동시켜서 물고기 폐사를 간편하게 최소화하는 방법을 고려할 수 있다 [8]. 세계적으로 사막의 먼지 (dust)가 육상 및 해상

의 녹조 및 적조 현상과 각각 깊은 관계를 가지며 특히 먼지 중의 철 성분에 의하여 조류 현상이 발생한다는 사실은 이미 널리 알려져 있다 [8]. Fig. 1에는 질소, 인 및 철이 풍부한 사하라 사막의 먼지가 미국과 남미로 이동하여 (A), 카나리군도와 플로리다에 남조류인 *Trichodesmium*이 수십km에 걸쳐 광범위하게 적조를 유발하는 것으로 알려져 있다 (B). 이러한 적조발생을 엽록소 (Chlorophyll- α) 농도로써, 인공위성을 이용하여 실시간 측정한 결과 아프리카 먼지 (Saharan dust)가 날아오고 나서 2일이 지나면 적조가 발생함을 알 수 있었다 (C). 이러한 외국의 잘 알려진 적조현상과 황사 (Aeolian dust) 관계에도 불구하고, 국내에서는 극히 제한적으로 황사 (Asian dust) 적조현상을 연구하였으나 [9,10], 명확히 상관관계를 밝히지 못하였다.

국내에서의 연구 현황을 살펴보면, 녹조 연구자, 적조 연구자, 황사 연구자들이 서로의 각 분야에서 최선을 하면서 훌륭한 논문들을 발표하고 있지만 학제간의 연구가 극히 취약하다. 외국에서는 미국의 John Martin이 1988년도에 철 가설 (iron hypothesis)를 제창한 이후로 20여 년 간 조류 이용 대기 중의 CO₂ 절감 방안을 북극, 적도 및 남극에서 15회에 걸쳐서 다양한 전공자 (지질학자, 생화학자, 해양학자, 물리학자, 조류학자)들이 공동으로 연구하여 괄목할만한 결과를 도출하고 있다[12]. 이에 반하여, 최근 국내에서는 경제부총리

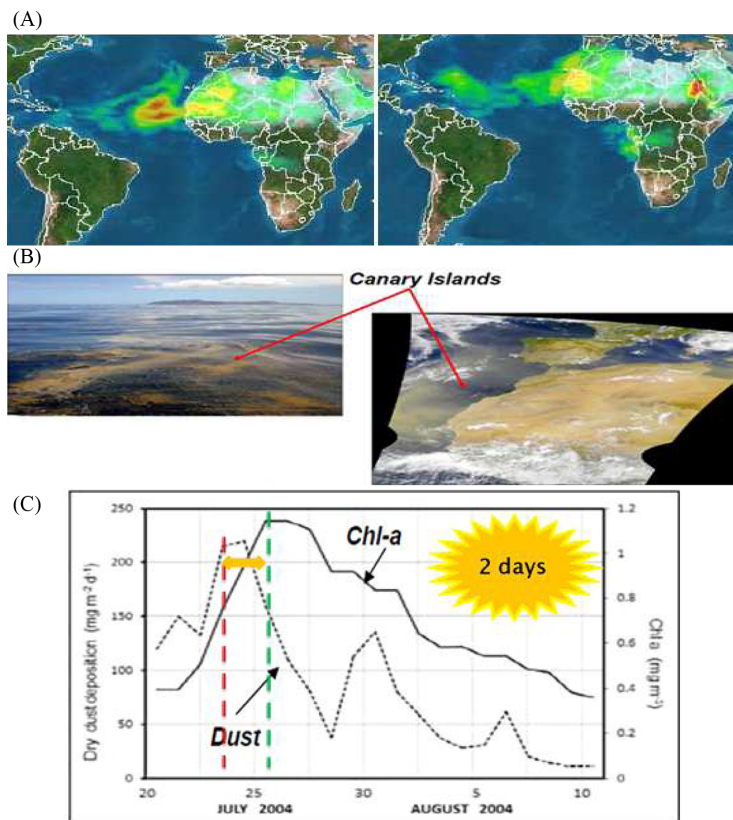


Fig. 1. (A) Satellite images of the African dust event on June 17, 1999 (Left) as dust leaves Africa, and on July 2, 1999 (Right) as the dust approaches North America. (B) Bloom of *Trichodesmium* - Canary Islands, August 2004 (Left) and just over W Africa, July 2004 (Right). (C) Chlorophyll- α vs. African dry dust deposition (model) ; no upwelling during the event [11].

Table 1. N₂-fixing and Non-N₂-fixing cyanobacteria [14]

Fixing	Freshwater (F)/Estuarine (E)/Marine (M)
N ₂ -Fixing	
<i>Anabaena</i>	F, E, M
<i>Aphanizomenon</i>	F, E
<i>Calothrix</i>	F, E, M
<i>Cylindrospermopsis</i>	F
<i>Lyngbya</i>	F, E, M
<i>Nodularia</i>	F, E, M
<i>Nostoc</i>	F, E, M
<i>Scytonema</i>	F, E, M
Non-N ₂ -Fixing	
<i>Microcystis</i>	F, E
<i>Oscillatoria</i>	F, E, M
<i>Planktonthrix</i>	F, E

가 2015년 1월부터 교토의정서에 따라서 화석연료 연소에 따른 온실가스 문제에 대하여 본격적으로 규제를 한다고 하지만, 국내의 학계에서는 이 분야에 대하여 뚜렷한 학문적 대안 없이 다만 미세조류에서 양질의 바이오연료를 생산하는 bio-refinery 분야에 집중하고 있는 현실이다 [13]. 조류 (algae)는 살아있는 생명체로서 강과 호수에서는 녹조, 연안과 해양에서는 적조를 각각 편의상 구분되지만 내면을 살펴보면 서로 호환적임을 Table 1에서 알 수 있다. 본 연구에서는 국립기상연구소의 황사 연구과로부터 황사 시료를 공급받아서 이를 황사 유무에 따른 배지 배양을 통하여 초기적 연구결과를 국내에서는 최초로 밝힌다. 나아가 국내에서 연례적으로 사회적 관심을 갖는 녹조 및 적조 발생에 따른 피해를 최소화하기 위하여 녹조 및 적조 성장의 필수 원소인 미량의 금속 화합물

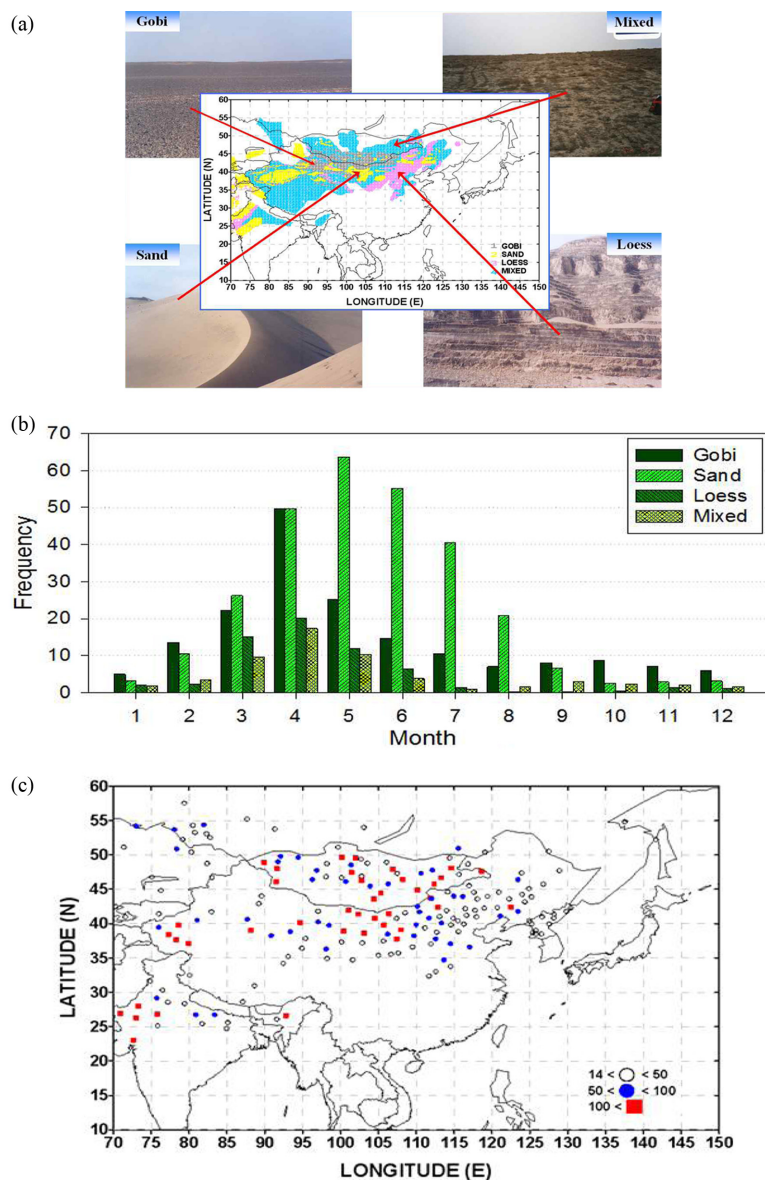


Fig. 2. (A) Pictorial representation of the Asian dust source region. (B) Asian dust occurrence frequency during 1998 to 2006. (C) Asian dust occurrence frequency with source regions during the year of 1998 to 2006 [15].

이 황사로부터 공급됨을 기존의 연구결과와 본 연구의 초기적 실험을 중심으로 살펴보려 한다.

2. RESULTS AND DISCUSSION

2.1. 황사의 발원지

우리나라에 영향을 주는 황사의 발원지는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 중국, 몽골, 인도, 방글라데시 등 아시아 대륙의 중심에 자리잡고 있다 [15]. 이 지역은 바다에서 멀리 떨어져 있는 내륙지방이고 비는 적게 내리는 반면 증발이 잘 되어서 매우 건조한 지역으로 1년 동안 내리는 비가 200 mm가 되지 않아 물이 부족하고 바람도 강해 식물이나 사람이 살기 매우 어렵다. 몽골과 중국의 접경지역에 걸친 넓고 건조한 사막 (고비, 바단지린)과 황토 고원, 내몽골고원의 모래폭풍은 강한 바람과 함께 모래와 흙먼지가 공중으로 떠오르는 무시무시한 폭풍으로 발원지에서는 1 km 앞을 구분할 수 없다. 황사 발원지의 넓이는 사막이 48만 km², 황토고원이 30만 km²에 인근 모래땅까지 합하면 한반도 면적의 약 4배나 되며 우리나라에 영향을 주는 발원지 역시 다양하다. 우리나라에는 주로 내몽골 고원이나 황토고원에서 떠오른 황사가 큰 영향을 주며, 인도의 북부 및 중국의 서북부 지역인 타클라마칸 사막은 한반도에서 멀리 떨어져 있어서 우리나라에 영향이 적은 편이다.

내몽골 고원과 만주는 한반도에서 가까운 발원지로서 발원한 황사가 우리나라로 가장 빨리 이동하여 영향을 줄 수 있는 곳으로서 한반도를 통과한 황사는 일본을 거쳐 제트기류를 따라 미국의 서해안까지 이동한다 [4,15].

우리는 통상적으로 황사가 봄 (3~5월)에만 주로 발생하는 것으로 인지하고 있으나 Fig. 1(B) 에서와 같이 황사는 연중 내내 발생하고 다만 초가을 (9월)부터 겨울 (1월)까지는 발생 빈도가 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 따라서 대부분의 사람들은 봄에 주로 발생하는 황사와 여름과 초가을에 발생하는 녹조 및 적조와는 상호 무관한 것처럼 알고 있다.

2.2. 황사의 주요성분

우리나라를 통과하는 황사는 북경을 통과한 5곳의 발원지에서 시작한 것으로 입자 직경이 $4.5 \pm 1.5 \mu\text{m}$ 인 것이 69%를 차지한다 [16]. 이와 같은 황사 입자들의 주성분은 Al, Fe, Si, K, Ca, Mn, Ti, Mg 등으로 구성되어 있으며, 이들은 Al과 같은 표준물질과 뛰어난 선형관계 ($r=0.99$)를 나타내고 있다 [5]. 그러나 알루미늄 (Al)은 조류성장과는 무관한 금속이므로 (Table 2) 이러한 선형관계식을 조류성장의 절대 요소인 철 (Fe)과의 상관관계를 본 연구에서 구하면 Table 3과 같다. 따라서 황사의 발원지를 알고 Fe를 측정하면 기타 성분들의 양을 선형적 관계를 이용하여 분석하기가 어려운 ppp ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 수준의 극초미량 금속성분을 간편하게 추정할 수 있다. 황사

Table 2. Algal growth necessary elements compared with components of particles of Asian dust, pollen, and clay particle

Algal Growth Element [17]		Asian Dust			Pollen		Clay Particle	
Element	Major Function	Mori et al. [4]	Han et al. [18]	Zhang et al. [5]	Lee et al. [19]	Jeong [20], Hwang [21]		
N	Amino Acid	o	o	o	o		o	
P	ATP/DNA	o	-	o	o		o	
Cl	Photosynthesis	-	o	o	o		o	
S	Photosynthesis	o	o	o	o		o	
Si	Cell Wall	-	o	o	o		o	
Na	Nitrate Reductase	o	o	o	o		o	
Ca	Alginates	o	o	o	o		o	
Mg	Chlorophyll	o	o	o	o		o	
Fe	Nitrate Reductase	o	o	o	o		o	
K	Enzyme Cofactor	o	o	o	o		o	
Mo	Nitrate Reductase	-	-	-	o		-	
Mn	Photosystem II	o	o	o	o		o	
Zn	Carbonic Anhydrase	o	o	o	o		o	
Cu	Photosystem II	-	o	o	o		o	
Co	Vitamin B	o	o	-	o		-	
V	Nitrogenases	o	o	o	-		-	

Table 3. Linear relationship between the concentration of seven major elements (y) with the one of iron (x) in the Asian dust (revised from [5])

Element (y) ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Site of Asian dust			
	Aksu	Dunhuang	Zhengbeitai	Changwu
Si	$3.55x + 1.58$	$7.4x + 0.36$	$7.87x + 2.40$	$7.12x + 1.1$
Ca	$1.82x + 1.48$	$0.8x + 0.54$	$0.47x - 0.07$	$1.69x + 0.68$
K	$0.49x + 0.35$	$0.5x - 0.34$	$1.49x + 0.43$	$0.47x + 1.14$
Mg	$0.49x + 0.57$	$4.8x - 2.3$	$0.85x - 2.36$	$0.44x - 0.51$
Ti	$0.08x + 1.85$	$0.16x - 0.88$	$0.21x + 1.79$	$0.12x + 0.11$
Mn	$0.02x + 1.96$	$0.02x - 0.88$	$0.02x + 0.85$	$0.02x + 0.14$



Fig. 3. Air pollution monitoring equipment as a sample collector of the Asian dust for the weekly iron profile.

가 오고나서 수일 내로 규조류에 의한 녹조나 적조가 발생함을 일부의 국내 연구자들이 발표하였다 [9,10]. 이는 황사가 최대의 성분인 규소 (24~29%)를 가장 많이 함유하여 [5] 이것이 수중에서 3 ppm 정도의 규산 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 가 되어 조류의 세포벽 및 규조류 성장의 주성분이 되기 때문인 것으로 추정된다. Table 3에는 규소가 황사 발원지와 크게 상관없이 개략적으로 Fe 농도에 7을 곱한 값으로 표시되므로 특정 시기의 황사 중의 Fe 농도를 알면 봄 또는 가을의 규조류에 의한 녹조 및 적조 발생을 사전에 예측할 수 있으리라 예상된다. 특히, PM_{10} 으로 분류되는 초미세먼지는 NH_4^+ 를 다량 함유하고 있는데, 이는 조류의 주요 질소원으로서 봄과 겨울 안개 속에 많이 들어있다 [16].

Fig. 3은 충남 태안시 안면도에 위치한 기후변화감시센터의 황사 포집기 (Tisch Environmental Inc.)를 나타낸다.

포집한 황사는 기초과학지원센터에서 황사중의 철 함량 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 구하였으며 2001년부터 2012년까지 구한 주간 철 분포도는 Fig. 4와 같았다.

이를 통하여 황사는 봄에 많이 발생하지만 그래도 연중 내내 발생함을 재확인할 수 있었다. 우리나라에 떨어지는 황사에 포함되어 있는 성분들은 Table 2와 같으며 조류 성장에 필요한 미량원소들을 대비하여 요약하였다. Table 2에는 황사 중에 Mo가 없는 것처럼 나왔으나 이는 단지 연구자들의 관심 분석에서 빠졌기 때문으로 추정된다. Mo는 nitrate reductase의 조효소로서 Fe와 더불어 조류 성장에 필수적인 미량 금속이다. 만일 Mo 결핍이 있으면 식물은 단백질을 합성할 수 없다. 담수 (0.0859 ppm), 해수 (0.0105 ppm), 황사 (1.57 ppm)에 각각 Mo가 존재한다 [22]. Table 2의 원소들은 조류 성장에 일반적으로 필요한 원소들인 Si, Fe, Mg, Mn, P, Ca, Na, K 등을 포함하는 물질들을 나타내었으며 효소의 보조인자로서 수중의 영양염류의 공급원으로 작용한다. Table 4는 광합성 반응에 필수적으로 필요한 원소 (Fe, S, Mn, Ca, K, Cl, Cu)들이다. 조류가 성장하기 위하여 외부의 에너지원으로서 햇빛이나 포도당의 공급을 받아서 생화학적 신진대사 과정을 거

Table 4. Trace elements required during the photosynthesis (rearranged from [29])

Element	Number	Location	Photosystem
Fe	3×4	4Fe-4S	I
	2 (14)	2Fe-2S in ferredoxin	I
	3×4	4Fe-4S	I
S	2	2Fe-2S in ferredoxin	I
	4 (18)	4 cystein in ferredoxin	I
Mn	4	Mn center	II
Ca	1	Mn center	II
K	1	Mn center	II
Cl	1	Mn center	II
Cu	1	Cytochrome	II
		bf complex reaction	

치면서 외부 환경요인이 만족한 조건이 될 때 녹조나 적조가 발생한다. 생긴 녹조나 적조는 자체적으로 cell lysis, virus, 영양분 고갈 또는 먹이사슬에 따라 다른 경쟁 종의 조류로 바뀌거나 죽은 사체는 강이나 바다의 바닥으로 가라앉아 이들이 다시 분해되어 무기영양분으로 바뀌는 life cycle을 유지한다. 따라서 조류 생합성과정의 조효소인 각종 mineral을 황사 등의 외부 요인과 내부적 biogenic recycle 및 upwelling을 통하여 만이 조류가 성장하므로 이를 적절히 제어한다면 녹조나 적조의 문제를 사전에 차단할 수 있을 것이다.

2.3. 적조 및 녹조현상

적조는 식물성 플랑크톤 (phytoplankton), 특히 와편모 조류 (dinoflagellate)가 대량으로 번식하여 바닷물 색깔을 적색 혹은 갈색으로 변화시키는 것을 말한다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 적조는 연안해역에서 쿠로시오 난류 흐름 방향으로 대부분 발생되며, 표층수의 수온이 상승하고 폭우, 장마 등으로 인한 담수의 유입으로 영양염이 크게 증가하고 무풍 상태가 계속되어 조류의 대수성장이 용이한 (exponential growth) 경우에 일어난다 [23].

특히 적조발생과 기상인자들 (수온, 강우량, 일조기간, 풍속)은 높은 상관성 ($R=0.856$)을 나타내었다 [24]. 우리나라의 경우는 여름 장마기간 중 육지의 오염물질이 바다로 대량 유입되어 바닷물을 부영양화 (eutrophication)시키면서 7, 8월부터 적조가 집중적으로 발생하고 있다. 한편, 녹조현상이란 부영양화된 호소나 유속이 느린 하천에서 부유성의 조류 (식물 플랑크톤)가 대량 증식하여 수면에 집적하여 물색을 현저하게 녹색으로 변화시키는 현상을 말한다.

최근 낙동강이나 대청호 등지에서 여름철 남조류가 대량 증식하여 물색을 변화시키는 경우 녹색으로 보이므로 녹조 현상이라 부르지만, 팔당호 경안천에서는 봄철 규조류가 대량증식하여 물색을 황갈색으로 변화시킨다. 또 소양호에서는 봄철 와편모조류가 대량 증식하여 물색을 적갈색으로 물들이는데 이런 경우는 연안에서의 적조와 비교하여 담수적 조라고 부른다. 녹조현상도 HAB (Harmful Algal Blooms, 유해조류)의 한 형태로 부영양화된 수역에서 종 다양성이 깨어지고 1종 또는 적은 수의 남조류가 우점하여 대량 증식하는

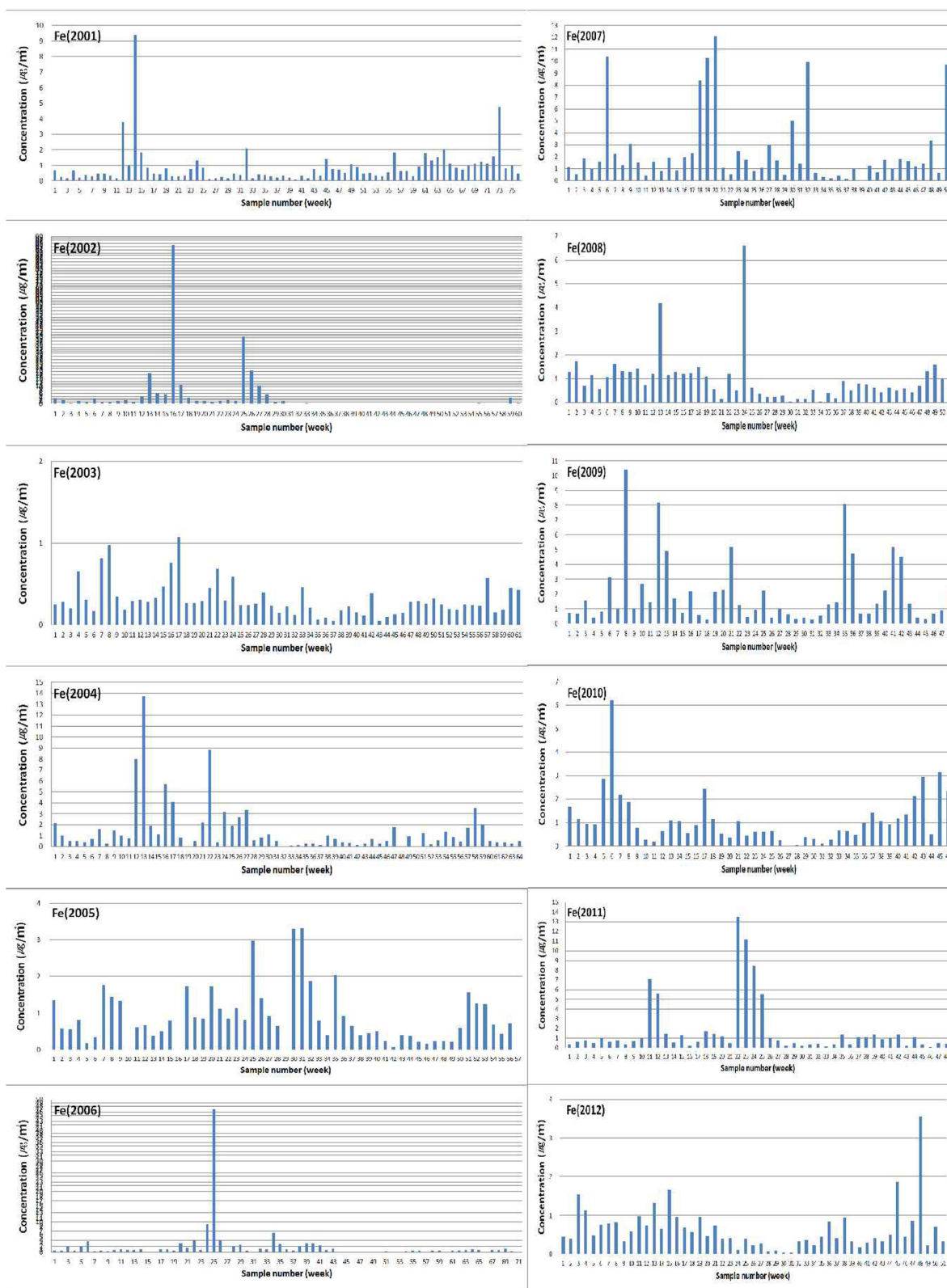


Fig. 4. The weekly distribution of the iron concentration during the years of 2001 to 2012.

현상이다. 이런 현상이 일어나면 그 수역의 생태계가 파괴되며 사회적, 경제적, 환경적인 측면에서 많은 문제를 유발하게

된다 [25].

낙동강 하류 수계의 우리나라 대표적 남조류인 *Microcystis*

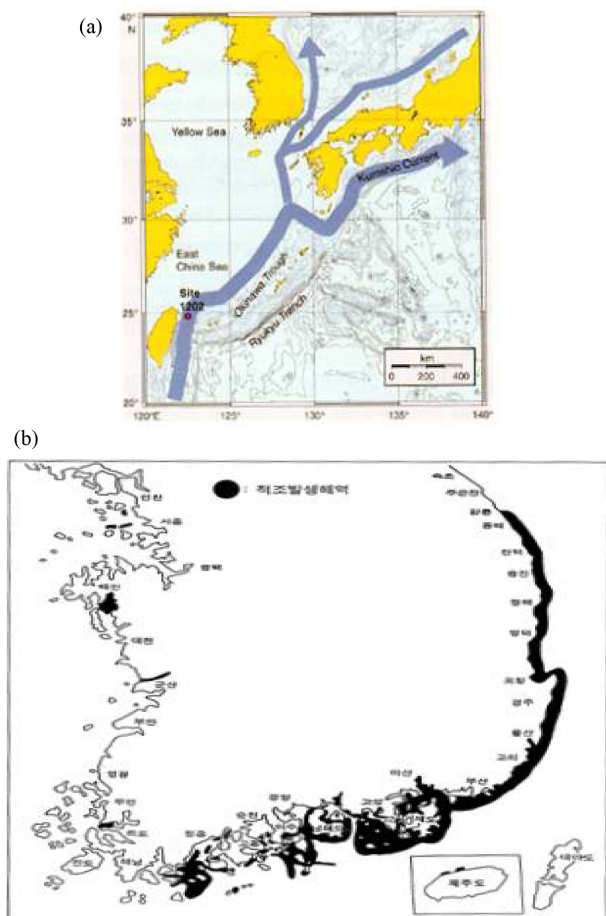


Fig. 5. (A) Current system in the Western Pacific (www-odp.tam.ted.edu), (B) Red tide occurrence along the coastal region in Korea during the year of 1995.

가 발생하는 독성 *Microcystin* 생태연구에서 조류의 성장은 수온, pH, 암모니아성 질소, 총인과의 상관성을 나타내었다 [26,27].

2.4. 녹조 및 적조현상의 발생 메카니즘

녹조 및 적조를 일으키는 조류 (algae)는 수중 또는 표층에서 광합성 반응으로 이산화탄소를 흡수하여 당을 합성할 때, 남조류의 경우에는 중탄산 이온의 형태로 흡수한다 [28]. 흡수된 이산화탄소는 산소와 ribulose biphosphate carboxylase (RuBisCO)에 의해 2분자의 3-Phosphoglyceric acid (3-PGA)를 합성한다. 이때 생성된 당은 조류의 세포벽, 세포막, 점액질 등 여러 가지 세포성분의 합성 소재가 된다. 조류는 빛이 없는 종속영양 상태에서는 외부의 에너지원 (예로써 포도당)이 공급되어야만 증식이 가능하므로 [13] 광합성으로 생성된 유기물을 이용하여 산소호흡이 일어난다. 조류의 산소호흡은 pentose phosphate 회로와 틸라코이드 막에 존재하는 전자전달계에 의해 이루어진다. 산소호흡으로 증식과 세포유지를 위한 에너지를 얻고 합성된 당이 충분히 축적되면 단백질이나 핵산으로 전환된다. 조류의 주된 햇빛 에너지 수용체는

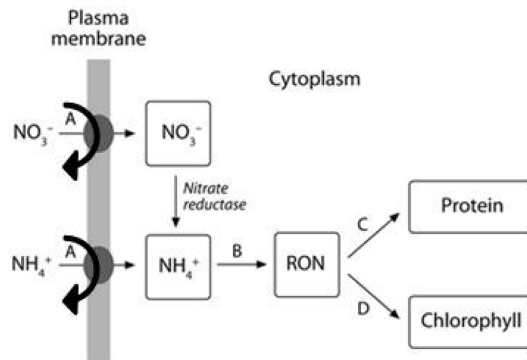


Fig. 6. A comparison of algal cell utilization of nitrate versus ammonium [17].

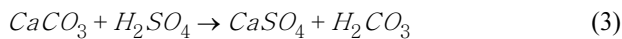
엽록소- α (Chlorophyll- α)이며 이의 분자식은 $\text{C}_{66}\text{H}_{68}\text{O}_5\text{N}_4\text{Mg}$ 이다. 이러한 엽록소가 식물체 mm^2 당 50만개가 존재한다 [29]. 바닷물 속에는 이산화탄소가 90 ppm, 질소가 15.5 ppm, 마그네슘 1,295 ppm이 녹아있다 [22]. 따라서 질소는 조류 생합성의 한계 원소가 되므로 조류가 증식하기 위해서는 질소대사가 특히 중요하다. 조류는 수중에 용해되어 있는 질소를 암모니아로 환원하여 아미노산을 합성한다. 이때 질소고정효소인 nitrogenase complex에 의해 일어난다. 이 효소 복합체의 효소들은 Fe-S의 산화환원 중심을 가지고 있으며 Fe-S 중심에는 2Fe-2S와 4Fe-4S 중심이 있다. 질소고정은 고도로 환원된 질소화효소에 의해 진행되며 전자를 reductase로 전달함으로써 환원된다. Reductase를 환원하는데 필요한 전자의 직접적인 공급원은 reduced ferredoxin이다. 철 이온의 결핍은 질소대사에 영향을 주고 nitrate reductase의 활성을 감소시킨다. 조류는 Fig. 6과 같이 nitrate reductase에 의해 질산염 이온을 암모니아로 환원 반응으로 얻어진다 [17].

이때 막 수송계 (A)에 의해 흡수된 후 암모늄은 효소작용에 의해 직접적으로 환원유기질소 (RON)로 전환되고 (B), 단백질과 엽록소 합성에 사용된다 (C,D). 이때 ATP는 plasma membrane에서 질소의 uptake mechanism 에너지원으로서 사용되고 NADPH는 chloroplast의 thylakoid membrane에서 작동한다. 조류의 생물학적 질소 고정효소는 nitrogenase complex에서 이루어지며 이는 철 이온을 cofactor로 한다. 질소고정효소인 nitrogenase complex에서는 32~36개의 철 이온을 포함하고 있다. 광합성 세포는 광반응 중심에 많은 양의 철이온이 존재한다. 질소고정 효소인 nitrate reductase의 활성도가 철의 농도에 영향을 받아 철 농도의 감소는 nitrate reductase의 활성을 저해하는 결과를 나타내었다 [30]. 해수의 철 농도는 대단히 낮다 (0.0034 ppm [22]). 바닷물의 수온이 올라가면 바닷속 침전물 (FeS)에 있는 철이 녹아서 물 표면으로 나타나며 죽은 생물이 부패될 때도 작은 양의 철이 용출된다. 황사에 의해서도 해수의 철의 농도가 증가됨이 알려졌다. 특히 대기 중에 부유하여 수송되는 황사 내에는 Al, Fe, Mg, Na 등의 금속과 질산염, 인산염, 황산염 등의 영양 염류를 다량 포함하고 있다. 따라서 황사현상이 해양생태계의 기초생산자인 식

물플랑크톤에 일차적으로 영향을 미치는 것으로 보고되었다 [9]. 조류에서 철을 채취하여 보면 얼마나 철이 저장되어있는지 알 수 있다. 철이 풍부할 때 조류의 철 저장단백질인 ferritin에 저장된다. 예를 들어 남조류인 *Synechocystis*에 50%의 철이 ferritin에 저장되어 있다 [31].

2.5. 황사의 발생과 녹조 및 적조현상 초기적 제어

중국에서 발생한 황사는 외부표면이 방해석 (CaCO_3)으로 이뤄져 있는데 [6], 북경이나 동북아 지역의 공업 지대를 통과하면서 석탄연소에서 발생하는 대기 중의 오염물질 (SO_2)과 다음과 같은 반응을 일으킨다.



(3) 식의 CaSO_4 는 황사를 통한 S의 주요 공급원이 되며, H_2CO_3 는 토양 산성화의 주요 물질로 작용하게 된다. 특히 철은 조류의 광합성 메카니즘에서 전자전달 과정에 절대적 필요 인자이다. 또한 질소 성분이 공기 중에서 nitrate로 변하여 물속에 녹아서 조류 세포 안의 cytoplasm 즉 세포액으로 membrane transfer 될 때에 세포액 내에 있는 nitrate reductase에 의하여 NH_4^+ 형태로 바뀌어서 조류 조직의 구성 성분인 엽록소 (Chlorophyll- α , $\text{C}_{55}\text{H}_{88}\text{O}_5\text{N}_4\text{Mg}$) 및 DNA, RNA, 아미노산 등의 원료로 사용된다. 이때 nitrate reductase의 cofactor 즉 조효소로서 Fe^{2+} 가 다량 소요되므로 조류가 효율적으로 질소 성분을 활용하려면 Fe^{2+} 는 절대적으로 필요하다. 또한 조류의 700 nm 조건에서의 광합성 1단계에서 엽록소 분자를 거쳐 3개의 4Fe-S 형태로 바뀌어서 전자가 전달되어 궁극적으로 ATP를 생성하여 대기 중의 CO_2 가 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 로 바뀌어 조류 세포 내에 에너지원으로 저장되어 조류의 안정된 증식을 가능하게 한다. 따라서 철이 없으면, 광합성도 못하고 질소 성분이 제대로 공급되지 못하므로 원활한 조류 증식이 불가능하여져서 장기적으로 황사 또는 다른 Source에 의하여 철이 공급되지 않는다면 중국에는 조류 성장이 멈춰져서 조류는 사라지게 된다. 특히 바다에는 육상에서 바다로 유입되는 다량의 철 (0.3 ppm)이 강 하구에서 염분 (S^{2-} 또는 PO_4^{3-})에 의하여 그대로 침전되므로 (FeS , FePO_4 등) 바다는 항상 철 부족 (0.0034 ppm [22]) 현상을 겪게 된다. 우리나라 독도 부근의 철 농도는 이보다 훨씬 낮은 약 1 nM 또는 6×10^{-5} ppm이다 [35]. 그러나 황사에 의하여 다량의 철 (40,000~60,000 ppm)을 공급하여 주므로 [5], 이 같은 철 결핍은 해소되어 조류가 정상적으로 증식하게 된다. 다만, 황사에 의하여 철이 풍부하더라도, 강한 햇빛에 의한 광합성, 25°C 이상의 수온, 게릴라성 폭우에 의하여 전국 곳곳에 낙진한 황사가 패어지고 씻겨서 호소로 강으로 바다로 흘러가서 풍부한 영양염류 (P, N, Si, Fe)를 충족하는 강수량, 안정한 수온약층 등이 모두 만족

될 때만 육상의 녹조 및 해상의 적조 현상을 보게 된다. 통상적으로 황사는 연례적으로 예외 없이 발생하고 다만 발생 정도의 차이 (발생일수, 발생지역 광범위성, 발생농도)만 있을 뿐이다. 이에 비하여 녹조나 적조는 조류라는 생명체에 의하여 발생하는 일종의 자연 정화 작용이므로, 조류가 자라는 최적 조건으로 조류 종류별로 필요한 상기의 햇빛세기, 수온, 영양염류, 안정한 수온 약층이란 4대 필요충분조건을 충족할 때만, 조류에 의하여 육상의 녹조 및 해안연안의 적조 현상이 발생하게 된다. 따라서 일반적으로 황사는 개략적으로 3~5월경에 주로 발생하여 왔지만 Figs. 2와 4에 도시한 바와 같이 발원지별 황사발생 빈도의 분포도를 보면 연중 내내 황사가 발생함을 알 수 있다.

한편, 녹·적조는 상기 4대 필요충분조건이 성립될 때만이 발생하므로 마치 황사와는 서로 무관한 것처럼 인식되어 왔다. 황사의 발생 정도는 서울, 경기, 충청, 전라 지역은 농도가 높은 반면에 강원, 경상 지역은 상대적으로 낮은 농도 분포도를 나타내었다. 하지만 조류 성장의 cofactor 즉 조효소나 광합성 메카니즘에서 필요한 Fe, Mg, Mn, Cu, S 등이 미량만 있으면 되므로 한반도의 황사 분포 차이의 영향은 전반적으로 미약하여서 녹조 및 적조가 우리나라 전역에 걸쳐서 Fig. 2B의 월별 황사 발생 분포도와 같이 거의 연중 발생하는 것이다.

전국 하천 및 호소지역을 상수원으로 사용하는 취수장 현황을 살펴보면, 모두 예외 없이 매년 녹조가 발생한다. 그러나 지하수나 용천수에는 일부 축산 폐수 등에 의한 오염을 제외하고는 녹조가 발생하지 않는다. 이러한 사실은 황사의 입자 크기 ($4.5 \pm 1.5 \mu\text{m}$)가 지하로 침투하기에는 상대적으로 크고 또한 지하수나 용천수의 솟아오르는 유속에 비하여 황사의 침강 속도 (falling velocity, settling velocity, terminal velocity)가 상대적으로 낮아서 황사가 지하수나 용천수에 침강하지 못한다. 따라서 지하수나 용천수는 항상 황사 Free 한 상태가 되어서 지하수나 용천수에 있을 수도 있는 휴면포자 (resting spore)가 황사로부터 미량의 cofactor 금속들 또는 필수성장 원소들을 공급받지 못한다. 그러므로 지하수나 용천수에는 조류가 성장하지 못하게 되어서 궁극적으로 지하수나 용천수가 녹조와는 무관하게 항상 깨끗하게 된다.

따라서 황사가 주로 발생하는 3~5월에는 취수장으로 사용되는 조류 발생 초기 단계의 제한된 공간 지역에 대하여 하천수 또는 호소 주위의 표층수 수면을 대형 차광 검정 덮개 천으로 덮어서 황사 낙진을 줄여서 취수장 유입수 부근의 녹조현상을 사전에 방지하고 조류에 의한 이취미 발생을 최소화할 필요성이 크다.

황사가 오는 3~5월을 제외한 기간 동안에는 이미 황사 분진이 전국 곳곳에 쌓여 있어서 여름철의 게릴라성 폭우에 의하여 땅 바닥에 쌓인 황사 분진이 들쳐지고 씻겨서 호소나 하천으로 유입되어서 호소나 하천에서 자라고 있던 조류에게 일시적으로 필수 미량 원소 (Fe, Mg, Mn, Mo, Cu, S 등)가 풍부하여져서 상술한 4대 필요충분조건이 동시에 충족된다면 녹조가 발생할 가능성이 크다.

이를 방지하기 위하여 햇빛이 조류에 도달하지 못하도록

취수장으로 사용되는 하천수 또는 호소 주위의 표층수 수면을 대형 차광 검정 덮개 천으로 상시적 24시간 내내 덮어줌으로써 조류의 광합성 반응을 차단시켜 조류가 낮에는 햇빛을 받아서 H_2O 가 O_2 로 바뀌면서 ATP를 만드는 광합성 메커니즘이 제대로 작동되지 못하게 한다. 나아가 밤에는 대기 중의 CO_2 가 $C_6H_{12}O_6$ 등 영양분으로 바뀌어 조류 성장의 에너지원으로 제대로 비축하지 못하도록 물 밑에 대기 중의 공기 (산소 20.9%) 또는 신선한 산소 (100%)를 주입시켜서 조류의 Calvin cycle을 억제하도록 한다 [8]. 특히 질소동화작용의 필수 효소인 nitrate reductase의 합성이 aerobic 조건에서는 억제되므로 [32], 야간에 조류 성장을 억제하기 위하여 물 밑에 aerobic 조건을 인위적으로 형성할 수 있다. 이는 궁극적으로 취수장 유입수의 녹조 및 이취미 발생을 억제하게 된다.

따라서 취수장으로 사용되는 초기 조류 발생 단계의 제한적 공간의 하천수 또는 호소 주위의 표층수 수면을 연중 24시간 상시적으로 대형 차광 검정 덮개 천으로 덮어 3~5월에는 황사 차단하고 나머지 기간에는 햇빛 차단하여 조류 성장 억제를 유지하여 저렴한 비용으로 Eco-Friendly 하게 녹조 및 이취미 발생을 방지할 수 있다. 특히 11월에도 간혹 2011년처럼 황사가 발생하고 팔당호에 *Anabaena* 같은 녹조가 겨울철임에도 발생한 경우가 있으므로 검정 덮개 천은 상기적으로 설치할 필요성이 크다. 그러나 상시적 검정 덮개 천의 설치로 인하여 저서 생물의 성장 환경이 변하여 2차적 생태 변화가 예상되므로 이에 따른 피해를 최소화하기 위하여 Photo Sensor 등이 부착된 대형 검정 차광 천의 자동 말기 장치를 이용하여 황사 없는 날의 밤 동안에 차광 천을 말아주어서 대기 중의 신선한 산소 공기가 수중으로 잘 전달되게 할 필요가 있다.

더불어 대형 검정 차광 천을 산소투과도가 높고 가격이 비싸지 않으며 기계적 물성이 우수한 Teflon, BOPP (Biaxially Oriented Poly Propylene), CPP (Cast Poly Propylene) 등으로 상기의 대형 검정 차광 천을 얇게 코팅함으로써, 1) 황사 분진 제거, 2) 햇빛 차단에 의한 조류 광합성 방해로 조류 성장 억제, 3) Teflon 등의 산소투과성 코팅 막으로 대기 중의 신선한 산소 공기가 표층수로 이동함으로써, 수중의 용존산소 고갈에 따른 저서 생물의 생태 환경 위험을 최소화하는 3가지 목적을 동시에 만족하는 기법을 활용할 수 있다.

Fig. 7은 적조가 연중 발생하는 거제도 부근의 진동만 연안 해저 퇴적물 깊이 (cm)에 따른 총 황화물량 (mg/g 퇴적물) 변화를 나타낸다. 따라서 조류가 활동하지 않는 겨울철에 해저 또는 강바닥 지표층 5 cm 이내를 흡입하여 제거한다면 조류 성장의 절대적 원소인 퇴적물 중의 황화철이나 인산철을 제거하고 휴면포자 (cyst 또는 resting spore)도 제거되어 이듬해의 녹조나 적조발생 가능성을 최소화할 수 있을 것이다 [8].

2.6. 황사 시료의 배양 및 현미경 관찰

국립기상연구소 황사연구과에서 공급받은 황사가 담긴 필터를 가로 세로 1 cm 크기로 잘라 1 mL 증류수에 넣어 15초간 vortexing하여 필터의 황사를 증류수 중에 녹인 후에, 증류수

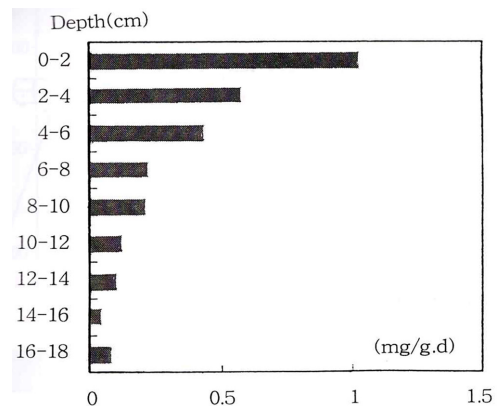


Fig. 7. Depth distribution of total sulfides in coastal sediments at Jindong Bay of Southern Korea [23].

의 상등액 200 μ L를 1% agar JM 배지 (Table 5)에 도말한 뒤 실링하였다.

배양은 26°C 인큐베이터에서 100 μ mol/m²s 백색 LED광을 사용하여 16시간 광을 조사하고 8시간 암 배양기를 두어 14일간 배양하였다. 황사가 담긴 필터를 씻어내지 않은 증류수만 도말한 실험구를 대조구 (control)로 사용하였으며, 1 mL 증류수에 가로×세로 1 cm 황사가 담긴 필터를 녹인 후 도말한 실험구 1과, 가로×세로 2 cm 황사가 담긴 필터를 녹여낸 뒤 도말한 실험구 2로 각각 비교 실험하였다 (실험구 1에 비해서 실험구 2는 황사 필터 면적이 4배로 설정).

실험 확인은 육안으로 매일 colony를 확인하였으며, 확인 후 실제 현미경으로 각각 40배율로 사진 촬영하였다. Fig. 8의 촬영결과와 같이 황사를 첨가하지 않은 대조구에서는 특이 사항이 없었으나, 황사를 첨가한 2종의 실험구 모두에서 녹색의 미세조류 군체가 발견되었다.

40배율로 확대되어 나타낸 바와 같이 황사 시료가 들어간 구에는 초록빛의 윤이 나는 colony를 보였다. 이처럼 황사 용액을 배양하여 생명체의 존재를 초기적이거나 확인한 것은 본 연구가 국내에서 최초이다. 이는 Yamaguchi 등 [33]이 황사에 *Antinobacteria*, *Bacilli*, *Sphingobacteria* 등의 세균이 존재함을 세계 최초로 최근에 자세하게 밝힌 결과와 정성적으로 일치하였다.

따라서 중국이나 몽고에서 발생한 황사는 한국의 ecosystem에 영향을 줄 것으로 국내에서 최초로 초기적 실험으로 그 가능성을 확인하였다.

본 연구 결과 (Table 2)는 황사 (4~6 wt%)나 꽃가루 (0.07 wt%) 및 황토 (11 wt%)에 함유되어 있으며 주로 세계적 대형 사막에서 날아오는 황사 (African dust, Asian dust, Australian dust, Arabian dust, Patagonian dust) 중의 철이 조류 성장에 절대적으로 중요하다는 수천 편에 이르는 외국의 연구들 [11, 12, 17, 34]과 잘 일치하였다. 특히 황사가 중국해, 동해, 북태평양 등의 적조 발생과 상관성이 크다는 최근 중국의 연구결과와 본 연구결과는 잘 일치하였다 [36].

Table 5. Chemical composition of JM medium

Stocks		per 200 mL
(1)	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	4.0 g
(2)	KH ₂ PO ₄	2.48 g
(3)	MgSO ₄ ·7H ₂ O	10.0 g
(4)	NaHCO ₃	3.18 g
(5)	EDTAFeNa	0.45 g
	EDTANa ₂	0.45 g
	H ₃ BO ₃	0.496 g
(6)	MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.278 g
	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	0.20 g
	Cyanocobalamin	0.008 g
(7)	Thiamine HCl	0.008 g
	Biotin	0.008 g
(8)	NaNO ₃	16.0 g
(9)	Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	7.2 g
Medium		per litre
Stock solutions 1-9		1 mL each

3. CONCLUSION

우리나라를 통과하는 황사는 중국과 내몽고 고원에서 발원하여 통상적으로 북경을 통과한 것으로 입자 직경이 $4.5 \pm 1.5 \mu\text{m}$ 인 것이 69%를 차지하는데, 황사 입자들의 주성분은 Fe, Si, K, Ca, Mn, Ti, Mg 등으로 구성된다. 한편, 호수에서 녹조, 바다연안에서 적조의 발생은 햇빛세기, 영양염류, 안정한 수온 약층, 대기 온도 또는 수온 (적조 $24 \pm 1^\circ\text{C}$, 녹조 25°C 이상), 게릴라성 강우, pH, 미량 금속 및 원소 등의 조건을 만족할 때 발생하게 되는데 햇빛세기, 안정한 수온 약층, 대기 온도 또는 수온, 강우, pH는 자연현상에 의해 결정되는 환경적 요인인데 반하여 영양염류 및 미량의 금속 및 원소는 외부의 공급원을 통하여만 공급 가능한 항목이다. 특히, 조류성장에 필요한 미량의 금속 및 원소는 Fe, Ca, Mg, Na, Cu, K, N, P, Cl, S, Si, Mo, Mn, Zn, Co, V 등을 나타내는데, 이는 황사의 주요 성분과 일치하는 성분들이다. 따라서 봄철 황사에 포함된 흙먼지와 미세 원소들이 땅에 떨어져서 게릴라성 폭우에 씻겨 내려가거나 또는 직접 호소나 바다물에 유입됨으로써 조류의

성장 조건 중 미량의 금속 및 원소를 수중에 공급하고 있거나 ferritin 같은 철 단백질에 저장되어 있다가 자연현상에 의한 제반적 환경적 조건 (햇빛세기, 영양염류, 수온약층, 수온)이 동시에 만족하는 시점에 특정한 종류의 조류가 급성장함으로써 녹조 및 적조가 발생하게 된다. 따라서 중국과 몽고에서 연례적으로 날아오는 황사는 한반도의 연례적 녹조 및 적조 발생과 상호 밀접한 관계를 갖는다. 특히 식수원으로 사용하고 있는 호소나 댐의 물에는 연례적으로 녹조가 발생하지만, 황사가 침투하기 어려운 지하수나 용천수에는 녹조가 전혀 발생하지 않음은, 황사와 조류 발생의 상관성이 높음을 알 수 있다. 녹조와 적조 발생을 최소화하는 간편한 방안으로서, 낮 동안에는 발생 초기의 제한된 지역에 한하여 검정 덮개 천으로 조류의 광합성을 방해한다. 밤 동안에는 저층에 공기나 순수 산소를 주입시켜서 탄소고정화 주요 효소인 rubisco가 carboxylase가 아닌 oxygenase를 작동하도록 하여 광합성 반응을 억제한다. 아울러 산소를 싫어하는 질소고정화 주요 효소인 nitrate reductase의 활성을 저하시켜 궁극적으로 조류의 성장과 재생을 억제한다. 특히 조류 발생이 연례적으로 발생하는 지역의 표층 바닥의 퇴적물을 5 cm 이내로 흡입 제거함으로써 휴면포자에 의한 이듬해의 inoculation 효과를 최소화하여 조류 발생을 억제한다. 본 연구의 배양 실험에서 황사에는 미량의 세균추정 물질이 존재하였고 이는 최근의 일본 과학자들의 황사 실험결과와 정성적으로 일치하였으며 중국과 몽고에서 날아오는 황사는 국내의 ecosystem에 영향미침을 초기적으로 검정하였다.

REFERENCES

1. Green wave killed by algal blooms, KISTI News Letter. <http://blog.naver.com/withkisti/220013041690>. (2014).
2. Song, M. Y., S. J. Hwang, and C. H. Park (2001) *A study on prevention methods of algal blooms-cases & strategic options*, Research Report, Kyonggi Research Institute. 2001-2018, Korea.
3. Chun, Y. S., H. K. Cho, H. S. Chung, and M. H. Lee (2008) Histo-

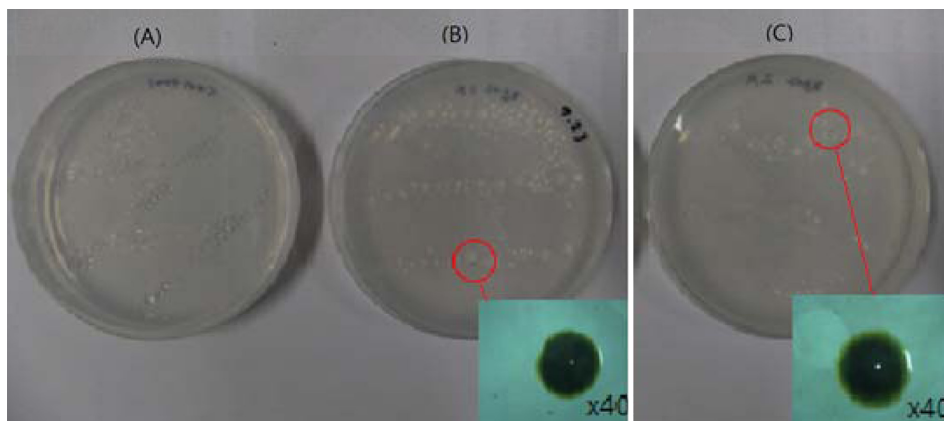


Fig. 8. Petri dish cultures at 26°C and for 14 days for the control without the dissolved Asian dust (A) and with one fold (B) and two folds (C) of the dissolved Asian dust, magnified 40 times.

- rical records of Asian dust events (Hwangsa) in Korea. *American Meteorological Society* 89: 823-827.
4. Mori, I., M. Nishikawa, T. Tanimura, and H. Quan (2003) Change in size distribution and chemical composition of kosa (Asian dust) aerosol during long-range transport. *Atmos. Environ.* 37: 4253-4263.
 5. Zhang, X. Y., S. L. Gong, Z. X. Shen, F. M. Mei, X. X. Xi, L. C. Liu, Z. J. Zhou, D. Wang, Y. Q. Wang, and Y. Cheng (2003) Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia: *Journal of Geophysical Research* 108(D9): 4261.
 6. Jeong, G. Y. and Y. S. Chun (2006) Nanofiber calcite in Asian dust and its atmospheric roles. *Geophys. Res. Lett.* 33: L24802.
 7. Na, G. H., K. D. Park, S. H. Lee, G. H. Kim, and J. B. Nam (1997) Dinoflagellates, *Cochlonidium polykrikoides* in situ. *Journal of Aquaculture* 10: 457-462.
 8. Kim, H. B., T. J. Kim, and J. C. Jeong (2014) Early warning, forecasting and removal of blue-green algal blooming apparatus and method. *Korean Patent* 10-1384971.
 9. Lee, H. I., Y. I. Lee, M. S. Choi, K. W. Lee, and J. K. Choi (2006) Influence of yellow sands (Asian dust) on marine environments Korea Institute of Ocean Science & Technology, Ministry of Maritime Affairs & Fisheries. BSPM 373-00-1826-5. Korea.
 10. 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. *Geophys. Res. Lett.* 34: L05602.
 11. Ramos, A. G., E. Cuevas, C. Perez, J. M. Baldasano, J. Coca, A. Redondo, S. Alonso-Perez, J. J. Bustos, and S. Nickovic (2008) Saharan dust and bloom of diazotrophic cyanobacteria in the NW African upwelling, *Geophysical Research Abstracts*. April 13-18. Vienna.
 12. Adhiya, J. and S. W. Chisholm (2001) Is ocean fertilization a good carbon sequestration option? Laboratory for Energy and the Environment. September. Massachusetts Institute of Technology, USA.
 13. L. Brennan, P. Owende (Jin, Y. S. Translated) (2010) Biofuels from microalgae - A review of technologies for production, processing and extractions of biofuels and co-products. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 14: 557-577.
 14. Paerl, H. W. and R. S. Fulton III (2006) Ecology of harmful cyanobacteria. pp. 95-109. *Ecology of harmful algae*. Springer Berlin Heidelberg, Germany.
 15. Park, S. U. (2012) Transport and deposition of Asian dust aerosols, *International Bioaerosol Symposium*. International Bioaerosol Symposium. May 16. International Bioaerosol Symposium, Seoul, Korea.
 16. Lee, H. Y., J. E. Kim, and Y. S. Chun (2013) The comparison of two severe Hwangsa (Asian dust) cases of spring and winter in Seoul, Korea. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.* 49: 49-56.
 17. Graham, L. E., J. M. Graham, and L. W. Wilcox (2010) *Algae*. 2nd ed., pp. 1-37. Benjamin Cummings, USA.
 18. Han, J. S., S. A. Shin, B. J. Kong, M. S. Park, S. U. Park, and S. J. Kim (2004) Soil chemical properties in Asian dust source region in northern China. *Journal of Environmental Impact Assessment* 13: 277-284.
 19. Lee, E. J., N. C. Kenkel, and T. Booth (1996) Pollen deposition in the boreal forest of west-central Canada. *Can. J. Bot.* 74: 1265-1272.
 20. Jeong, G. Y. and Y. S. Chun (2006) Nanofiber calcite in Asian dust and its atmospheric roles. *Geophys. Res. Lett.* 33: L24802
 21. Hwang, J. Y., M. I. Jang, J. S. Kim, W. M. Cho, B. S. Ahn, and S. W. Kang (2000) Mineralogy and chemical composition of the residual soils (Hwangto) from South Korea. *J. Miner. Soc. Kor.* 13: 147-163.
 22. Turekian, K. K. (1968) *Oceans*, Englewood, Cliffs, N. J., Prentice-Hall, Australia.
 23. Kim, H. G. (2005) Harmful Algal Blooms in the Sea, *Dasom Publishing Co, Ltd.*, Busan, Korea.
 24. Yoon, H. J. (2005) Meteorological information for red tide: Technical development of red tide prediction in the Korean coastal areas by meteorological factors. *Journal of the Korea Institute of Maritime Information & Communication Sciences* 9: 844-853.
 25. Yoon, S. K. (2006) *Effect of algal growth in transitional zone on water quality of the lacustrine zone in Lake Paldang*. M.S. Thesis. School of Industrial Management. Hanyang University, Seoul, Korea.
 26. Choi, A. R., H. M. Oh, and J. A. Lee (2002) Ecological study on the toxic *Microcystis* in the Lower Nakdong River. *Algae*. 17: 171-185.
 27. K. Kunimiz (Ryu, K. J. Translated) (1995) Environmental toxins-toxic algal blooms and dioxins.
 28. Watanabe, Y. (Kim, B. C., E. G. Kim, H. D. Park, J. K. Chun, Translated (1999)) (1994) *Toxic cyanobacteria in lake*. Dong Hwa Technology Publishing Co., Korea.
 29. Lewis, R., (2009) *Life*. 6th ed., McGraw Hill Higher Education, NY, USA.
 30. Graham, J. M. (1991) Symposium introductory remarks: A brief history of aquatic microbial ecology. *The Journal of Protozoology* 38: 66-69.
 31. Falkowski, P. (1997) Evolution of the nitrogen cycle and its influence on the biological sequestration of CO₂ in the ocean. *Nature* 387: 1724-1725.
 32. Gordillo, F. J. L., R. Garcia-Ruiz, A. Corzo, J. Lucena, and F. X. Niell (2001) Nitrate reductase activity in an eutrophic reservoir during the stratification cycle. *Internat. Rev. Hydrobiol.* 86: 603-618.
 33. Yamaguchi, N., T. Ichijo, A. Sakotani, T. Baba, and M. Nasu (2012) Global dispersion of bacterial cells on Asian dust. *Sci. Rep.* 2: 525.
 34. Cavender-Bares, K. K., E. L. Mann, S. W. Chisholm, M. E. Ondrusek, and R. R. Bidigare (1999) Differential response of equatorial Pacific phytoplankton to iron fertilization. *Limnol. Oceanogr.* 44: 237-246.
 35. Takata, H., K. Kuma, Y. Isoda, S. Otsuka, T. Senjyu, and M. Minagawa (2008) Iron in the Japan Sea and its implications for the physical processes in deep water. *Geophysical Research Letters* 35: L02606.
 36. Tan, S. C., X. Yao, H. W. Gao, G. Y. Shi, and X. Yue (2013) Variability in the correlation between Asian dust storms and chlorophyll a concentration from the North to Equatorial Pacific. *PLoS One* 8: e57656.