



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

동아시아 해역에서 해양기원 에어로졸  
추정 및 기후복사 효과에 관한 연구

濟州大學校 大學院

地球海洋科學科

崔 瑜 娜

2018 年 2 月

석사학위논문

동아시아 해역에서 해양기원  
에어로졸 추정 및 기후복사 효과에  
관한 연구

제주대학교 대학원

지구해양과학과

최 유 나

2018 年 2 月

# 동아시아 해역에서 해양기원 에어로졸 추정 및 기후복사 효과에 관한 연구

지도교수 송 상 근

최 유 나

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

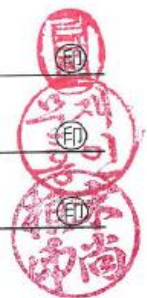
2017 年 12 月

최유나의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 김 태 훈

위 원 문 재 홍

위 원 송 상 근



제주대학교 대학원

2017 年 12 月

Estimation of natural marine aerosols and their  
climate radiative effect in the eastern Asian  
ocean

Yuna Choi  
(Supervised by professor Sang-Keun Song)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of  
Master of Science

2018. 2.

This thesis has been examined and approved.

Department of Earth and Marine Sciences  
GRADUATE SCHOOL  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

List of Figures .....	ii
List of Tables .....	v
제 1 장 서론 .....	1
제 2 장 자료 및 방법 .....	5
2.1. 자료 및 연구방법 .....	5
2.2. DMS flux 산출방법 .....	7
2.2.1. 해수 DMS 농도([DMS] <sub>aq</sub> ) 산출 .....	7
2.2.2. 해양에서 대기로의 전달속도( $k_w$ ) 산출 .....	9
2.3. 모델 구성 .....	10
2.3.1. 광학 모델 .....	10
2.3.2. 대기복사전달 모델 .....	12
제 3 장 결과 및 고찰 .....	15
3.1. 전지구 DMS flux의 시·공간 변화 및 장기 추세 분석 .....	15
3.2. 동아시아 DMS flux의 시·공간적 변화 경향 .....	28
3.2.1. 연변화 .....	28
3.2.2. 월/계절 변화 .....	35
3.3. 해양기원 에어로졸에 따른 직접적 복사강제력 추정 .....	46
3.3.1. 에어로졸 광학특성(AOD) 분석 .....	46
3.3.2. 에어로졸 직접적 복사강제력(DRF) 추정 .....	54
제 4 장 요약 및 결론 .....	63
참 고 문 헌 .....	66
Abstract .....	72

## List of Figures

- Fig. 1.** Spatial distributions of annual mean DMS flux ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ) during 2000–2015. The DMS flux in 2005 was excluded due to the unavailability of MLD for calculation the DMS flux during January through June in 2005 ..... 16
- Fig. 2.** Yearly variations in DMS flux, SST, SSW, Chl-a, and DMS cocentrations for each latitude band ( $10^\circ$  interval between  $0^\circ$  and  $60^\circ$ ) during the study period (2000–2015). Their values in 2005 were excluded due to the unavailability of MLD during January through June in 2005 ..... 20
- Fig. 3.** Monthly variations in DMS flux, SST, SSW, Chl-a, and DMS concentrations for each latitude band ( $10^\circ$  interval between  $0^\circ$  and  $60^\circ$ ) during the study period (2000–2015) ..... 22
- Fig. 4.** Yearly variations in the global sea-to-air DMS flux ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ) calculated in the Northern and Southern Hemisphere during the study period (2000–2015). The DMS flux in 2005 was excluded due to the unavailability of MLD for calculation the DMS flux during January through June in 2005 ..... 25
- Fig. 5.** The linear trends in DMS flux, SST, SSW, Chl-a, and DMS concentrations over 2000–2015, which were derived from single variable linear regressions of the DMS flux , SST, SSW, Chl-a, and DMS using their monthly data. The dots indicate the significant values at the 90% confidence level ..... 26
- Fig. 6.** Spatial distributions of annual mean DMS flux ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ) in the eastern Asian ocean during the study period (2013–2015) ..... 29
- Fig. 7.** Spatial distributions of annual mean SST, SSW, Chl-a, and DMS concentrations in the eastern Asian ocean during the study period

(2013–2015) .....	30
<b>Fig. 8.</b> Yearly variations in DMS flux for each latitude band (4° interval between 29° and 45°) during the study period (2013–2015) .....	33
<b>Fig. 9.</b> Yearly variations of SST, SSW, Chl-a, and DMS concentrations for each latitude band (4° interval between 29° and 45°) during the study period (2013–2015) .....	34
<b>Fig. 10.</b> Spatial distributions of DMS flux ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ) in the eastern Asian ocean during four seasons 2013–2015 .....	36
<b>Fig. 11.</b> Spatial distributions of SST, SSW, Chl-a, and DMS concentrations in eastern Asian ocean during four season 2013–2015 .....	37
<b>Fig. 12.</b> Seasonal variations in DMS flux for each latitude band (4° interval between 29° and 45°) during the study period (2013–2015) .....	41
<b>Fig. 13.</b> Monthly variations in DMS flux for each latitude band (4° interval between 29° and 45°) during the study period (2013–2015) .....	42
<b>Fig. 14.</b> Seasonal variations in SST, SSW, Chl-a, and DMS concentrations for each latitude band (4° interval between 29° and 45°) during the study period (2013–2015) .....	44
<b>Fig. 15.</b> Monthly variations in SST, SSW, Chl-a, and DMS concentrations for each latitude band (4° interval between 29° and 45°) during the study period (2013–2015) .....	45
<b>Fig. 16.</b> Spatial distributions of annual mean AOD ( $\tau_{550}$ ) derived from DMS flux in the eastern Asian ocean during 2013–2015 .....	48
<b>Fig. 17.</b> Spatial distributions of seasonal average AOD ( $\tau_{550}$ ) derived from DMS flux during 2013–2015 .....	50
<b>Fig. 18.</b> Monthly variations of AOD( $\tau_{550}$ ) derived from DMS flux (AOD (DMS)) for each latitude band (4° interval between 29° and 45°) during the study period (2013–2015) .....	51
<b>Fig. 19.</b> Monthly variations of AOD derived from DMS flux AOD (DMS) simulated by OPAC, and MODIS AOD. The line represents the	



contribution (%) of AOD (DMS) to MODIS AOD .....	53
<b>Fig. 20.</b> Spatial distributions of the direct radiative forcing (DRF) due to annual mean DMS-related aerosol (e.g. sulfate) at SFC, TOA, and ATM during the study period (2013–2015) .....	56
<b>Fig. 21.</b> Yearly variations of DRFs due to DMS-related aerosol (e.g. sulfate) at SFC, TOA and ATM for each latitude band (4° interval between 29° and 45°) during the study period (2013–2015) .....	57
<b>Fig. 22.</b> Spatial distributions of DRFs due to seasonal average DMS-related aerosol(e.g. sulfate) at SFC during 2013–2015 .....	59
<b>Fig. 23.</b> Same as Fig. 22 except for the DRF at TOA .....	60
<b>Fig. 24.</b> Same as Fig. 22 except for the DRF at ATM .....	61
<b>Fig. 25.</b> Monthly variations of DRFs due to DMS-related aerosol (e.g. sulfate) at SFC, TOA, and ATM for each latitude band (4° interval between 29° and 45°) during the study period (2013–2015) .....	62

## List of Tables

<b>Table 1.</b> Example of 'INPUT' file namelist in SBDART model .....	14
<b>Table 2.</b> Summary of Mann-Kendall (MK) statistics of DMS flux for each latitude band (10° interval between 0° and 60°) over the global ocean during the study period (2000-2015) .....	27
<b>Table 3.</b> Yearly variations in DMS flux ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ) for each latitude band (4° interval between 29° and 45°) during the study period (2013-2015)	33
<b>Table 4</b> Optical properties (RH=80%) of DMS-related aerosol (e.g. sulfate) in the eastern Asian ocean at a wavelength of 550 nm estimated by OPAC model in study area .....	47

## I. 서론

에어로졸(aerosol)은 고체 및 액체상태 또는 두 물질이 혼재되어 대기 중에 부유하는 미세입자로서, 최근 기후변화와 지구화학적 순환에서 대기 에어로졸의 중요성은 잘 알려져 있다(Seinfeld and Pandis, 1998). 대기 중 에어로졸은 발생원에 따라 인위적 에어로졸과 자연적 에어로졸로 구분된다. 인위적 에어로졸은 산업 활동에 의해 배출되는 검댕(black carbon, BC), 황산염(sulfate,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), 질산염(nitrate,  $\text{NO}_3^-$ ) 등이 있으며 자연적 에어로졸은 화산활동과 같은 자연적인 과정에서 배출되는 황사, 해염 에어로졸 등을 말한다. 대기 중 에어로졸은 유입된 복사의 흡수 및 산란 등에 의해 지구복사수지를 조절할 수 있는데(Charlson et al, 1987), 검댕과 같은 에어로졸 입자는 태양복사를 대기상단(top of the atmosphere, TOA)으로부터 흡수하여 지구온난화에 기여하고, 황산염과 같은 에어로졸 입자는 유입된 태양복사를 산란하여 대기 밖으로 내보냄으로써 냉각화에 기여할 수 있다(송상근과 손장호, 2014; Forster et al., 2007; Ramanathan and Carmichael, 2008; Ramana et al., 2010).

기후변화에서 에어로졸 역할은 복사강제력(Radiative forcing, RF)의 변화를 통하여 지구-대기 시스템의 에너지 평형에 영향을 주는 것으로 알려졌으며, 이에 대한 영향력의 크기는 기후모델 및 복사전달모델 결과의 분석을 통해 규명될 수 있다. 여기서, 복사강제력이란 잠재적인 기후변동 메커니즘으로 중요한 지표로서 지구시스템에 나타나는 에너지의 작은 변화들을 정량화 한 것을 의미한다. 복사강제력의 단위는 제곱미터 당 와트( $\text{W}/\text{m}^2$ )로 나타내고 복사강제력 값이 양의 복사강제력으로 나타나면(0보다 크면) 표면 부근에 온난화로 이어지고 음의 복사강제력(0보다 작으면)으로 나타나면 냉각화로 이어진다(IPCC, 2014). 에어로졸 입자는 에어로졸의 성질과 크기에 따라 직·간접적으로 영향을 줄 수 있는데, 직접적 효과는 대기 중 에어로졸이 태양복사를 직접 산란하는 효과를 말하며, 간접적 효과는 구름생성에 관여하여 구름알베도에 의해 복사균형을 변화시키는 효과를 말한다(Albrecht, 1989).

대기 중 에어로졸에 관한 연구는 인위적 에어로졸을 주제로 한 연구가 주로 수행되어 왔다. 인위적 에어로졸 관련 연구에서 2013년 제주 애월 지점의 시간별 PM<sub>2.5</sub> 화학성분 농도를 분석한 결과, 화학 성분 중 water-soluble 성분 에어로졸의 광학 특성 및 직접적 복사강제력에 미치는 영향이 가장 크게 나타났으며, 직접적 복사강제력의 변화는 대상지역 에어로졸 화학성분 농도와 광학특성, 그리고 기상 및 환경 조건에 따라 크게 변화할 수 있다고 보고했다(박연희 등, 2017). 이외에도, 2010년 서울에서 측정된 시간별 에어로졸 자료를 사용하여 복사강제력을 산출한 결과, 전체 성분 중 water-soluble이 복사효과가 가장 큰 기여도를 차지하였으며, 그 중에서 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 음의 복사강제력이 가장 크게 기여한 것으로 나타났다(송상근과 손장호, 2014). 또한 전체 에어로졸 화학성분별 복사 효과는 1월에 가장 높게, 9월이 가장 낮게 음의 복사강제력이 나타났다. 이와 같은 연구 외에도 인위적인 에어로졸 분석과 관련된 많은 연구들이 수행되어 왔다. 한편 자연적 에어로졸에 대한 연구를 살펴보면, 황화디메틸(dimethyl sulfide, DMS)에 의한 황산염 에어로졸의 직접적 복사강제력은 평균  $-0.23 \text{ W/m}^2$ , 화산에 의한 황산염 에어로졸이 평균  $-0.21 \text{ W/m}^2$ 으로 나타났으며, 화산활동에 의한 황산염과 DMS에 의한 황산염을 형성하는 에어로졸 배출원이 구름 알베도에 가장 큰 영향을 준다고 보고 된 바 있다(Rap et al., 2013). 이외에도 자연적 및 인위적 에어로졸이 포함된 위성자료를 활용하여 10년간(2001~2010년) 동아시아 지역 에어로졸 성분별 복사강제력을 산정한 결과, 중국 남부 충칭 공업지역에서 가장 큰 음의 복사강제력이  $-99.52 \text{ W/m}^2$ 으로 추정되었고, 동아시아 전체적으로 태양복사 비흡수 물질인 해염과 황산염 혼합물의 빈도가 가장 높은 비율로 나타났다(정지현 등, 2013).

자연적 에어로졸 중 DMS는 황산염 에어로졸의 주요 자연적 배출원인 주로 해양 표층의 식물성 플랑크톤에 의해 생성되며, 동물플랑크톤 및 박테리아 간의 복잡한 상호 작용 등에 의해서도 생성된다(Dacey and Blough 1987; Andreae 1997). 또한 식물 플랑크톤은 DMS의 전구물질인 DMSP (Dimethylsulfoniopropionate)를 합성하며 체내 농도는 플랑크톤 종에 따라 다른 것으로 알려져 있다(Keller et al., 1989). 해양에서 대기로의 교환 작용을 통해 배출된 DMS는 화학적으로 불안정하기 때문에 수 시간에서 수 일 내에 빠르게 산화된다(김기현 등, 2002; Kim and Andreae, 1992). DMS는 산화과정을 통해 최종적으로 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)을 생성하여

강수의 산도를 조절하는데 영향을 주거나(Nguyen et al. 1990), 황산염(sulfate,  $\text{SO}_4^{2-}$ )을 형성할 수 있기 때문에 지구복사 수치 및 기후변화에 큰 영향을 미칠 수 있다(Charlson et al. 1987; Hobbs 1993).

DMS와 관련된 국내외 연구를 살펴보면, 전 지구의 여러 해역을 대상으로 측정된 장기간(1972년 3월~2009년 2월)의 DMS 관련 자료를 이용하여 DMS 농도 및 DMS flux 분포를 분석하였다. 그 결과, DMS 농도는 중위도 및 고위도 해역에서 높은 DMS(최고 7nM)가 나타난 반면, DMS flux는 북반구 저위도(2.6 Tg/yr)와 남반구 저위도 및 중위도(2.8 Tg/yr)에서 높게 산출되었다(Lana et al., 2011). 또한 2000~2100년 동안 기후변화시나리오(IPCC SRES A1B)에 근거한 DMS 수치모의 결과에 따르면 과거 1861~1890년에 비해 2061~2090년 미래의 DMS flux가 약 10% 감소하는 것으로 전망된 바 있다(Kloster et al. 2007). 이 외에도 우리나라 돌섬 지역에서 1996년 1월(10일간) 관측한 평균 해수 농도는 DMS 농도는  $4 \pm 3.4$  nM으로 일반 연안해수의 평균 DMS 농도와 유사한 수준으로 나타났다. 또한 관측된 DMS 농도를 통해 계산된 DMS flux는 평균  $3.1 \pm 6.8$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$  이었으며 산출된 DMS flux는  $0.02 \sim 23$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 까지 광범위하게 나타났다(김기현 등, 1996).

IPCC 보고서에 따르면 황산염 에어로졸의 주요 배출원은 Biomass burning (2%)로부터 불완전한 연소와 함께 화석연료 연소(약 72%)로부터의  $\text{SO}_2$  배출량을 통한 것이고, 해양의 식물성 플랑크톤에 의한 DMS (dimethyl sulfide) 배출량(19%)으로 나타난다고 보고된 바 있다(IPCC, 2007). 황산염 에어로졸의 주요 배출원에서 인위적 배출원에 의한 비율이 높지만 식물성 플랑크톤에 의한 DMS 배출량이 기여하고 있는 비중이 약 19%로 무시할 수 없는 비율이다. 그럼에도 불구하고 국내외적으로 인위적 에어로졸 관한 연구에 비해 자연적 에어로졸 연구는 훨씬 적은편이다. 자연적 에어로졸은 인위적 에어로졸과 다르게 효과적으로 제어할 수 없기 때문에 그 중요성이 큼에도 불구하고 아직 이에 대한 이해도가 부족한 실정이다(Satheesh et al., 2004). 특히, 동아시아는 급격한 경제성장에 따른 화석 연료의 사용증가로 인해 인위적 에어로졸 배출 또한 증가하였다. 이로 인해 인위적 에어로졸에 대한 연구가 많이 수행되었으나 자연적 에어로졸에 대한 정보 및 연구는 비교적 적은편이다.

앞에서 언급한 바와 같이, DMS flux에 의해 형성되는 황산염은 지구복사 수지 및 기후변화에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 전반적인 DMS flux의 장기 추세와 DMS에 의한 황산염 에어로졸의 복사효과 등의 연구는 매우 중요하다고 사료된다. 하지만 해수 DMS 농도를 관측하기엔 시·공간적인 제약이 많아 넓은 영역에서 DMS flux의 장기 추세, DMS에 의한 황산염 에어로졸의 복사효과 등의 연구는 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 DMS flux의 전반적인 장기 추세와 주요 인자를 추정 및 분석하기 위해 인공위성 및 모델링 자료를 이용하여 전지구 DMS flux를 산출하였다. 또한 3년(2013~2015년)동안 동아시아 해역에서 산출된 DMS flux를 이용하여 광학모델 및 대기복사전달 모델을 수행하였으며, 이를 통해 DMS 관련 에어로졸(DMS-related aerosol) 즉, 황산염의 광학 특성(AOD)과 복사효과(직접적 복사강제력)를 분석하고자 한다.

## II. 자료 및 방법

### 2.1. 자료 및 연구방법

본 연구의 대상지역인 동아시아 해역(약 29°~45°N, 112°~135°E)에서 DMS flux를 산출하기 이전에, 먼저 전지구적 DMS flux의 장기 추세와 DMS flux에 영향을 주는 주요 인자를 추정하고자 지난 16년간(2000~2015년)의 인공위성 관측 및 모델링 월별 자료를 이용하여 DMS flux를 산출하였다. DMS flux 산출 시 클로로필 a(chlorophyll a, Chl-a), 혼합층 깊이(mixed layer depth, MLD), 해상풍(sea surface wind, SSW)과 해수면 온도(sea surface temperature, SST) 등의 자료가 사용되었으며, 정량적인 DMS flux 산출 방법은 2.2절에 자세히 기술하였다. 또한 위와 같은 자료를 통해 산출된 DMS flux를 이용하여 전지구 DMS flux의 연변화 및 시·공간적분포를 분석하였다.

전지구 DMS flux를 세부적으로 분석하기 위하여 전지구 영역의 북반구와 남반구 0°~60° 사이를 10° 간격으로 즉, 0°~10°N, 10°~20°N, 20°~30°N, 30°~40°N, 40°~50°N, 50°~60°N, 0°~10°S, 10°~20°S, 20°~30°S, 30°~40°S, 40°~50°S, 50°~60°S으로 총 12개의 위도로 구분하여 연변화 및 월변화를 살펴보고, 주요 요소(Chl-a, DMS, SSW, SST)들도 함께 분석하여 DMS flux와의 관계도 같이 살펴보았다. 여기서, 60° 이상의 고위도는 대부분 얼음으로 덮혀 있는 해역으로서 SST와 Chl-a의 인공위성 관측 자료의 한계로 인해 본 연구에서는 부득이하게 고위도 해역(60° 이상)을 제외하였다. 전반적인 DMS flux의 장기변동 추세를 분석하기 위해 월별 DMS flux 값을 이용하여 위경도별 각각의 기울기 (slope)를 계산하여 공간적으로 표출하였으며 장기간 선형추세는 단변수 선형회귀법(single variable linear regression)으로 계산하였다. 이외에도 DMS flux의 연평균 증가율 및 감소율 산정하기 위하여 Mann-kendall (MK) 검정법을 통해 살펴보았다. MK 검정법은 주로 증가와 감소 추세를 반복하는 자료의 경향성을 분석하기 위해

적용된다(Simmonds et al. 2004; Anttila et al. 2010).

동아시아 해역에서의 에어로졸 광학 특성 및 복사강제력을 추정하기 위한 기초 작업으로, 총 3년간(2013~2015년까지) 동아시아 해역의 인공위성 관측 자료 및 모델링 자료를 이용하여 DMS flux를 산출하였다. 동아시아 해역의 DMS flux를 산출하기 위해 필요한 자료는 인공위성 자료의 8일 합성도(8-day Composite)를 통해 구축하였으며(SSW 제외), 이와 관련된 내용은 2.2절에 자세히 나타냈다. 이렇게 산출된 DMS flux를 이용하여 동아시아 해역의 DMS flux 연변화와 주요 요소(Chl-a, DMS, SSW, SST)들의 시·공간적분포를 분석하였다. 또한 세부적으로 상세 분석을 위해 동아시아 해역을 4° 간격으로 즉, 29°N~33°N, 33°N~37°N, 37°N~41°N, 41°N~45°N으로 구분하여 DMS flux와 함께 주요 요소(Chl-a, DMS, SSW, SST)들의 시·공간 변화를 분석하였다.

동아시아 해역에서 DMS 관련 에어로졸(DMS-related aerosol) 즉, 황산염 에어로졸을 추정하였으며 이를 통해 에어로졸의 광학특성 및 복사강제력을 추정하였다. 광학 특성 및 복사강제력 추정을 위해 이용된 모델은 OPAC (Optical Properties of Aerosols and Clouds) 모델과 SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) 모델이다. OPAC 모델의 입력자료 구성을 위해 Hess et al. (1998)에서 제시된 추정식을 이용해 DMS flux를 수농도(number density)로 전환하였다. Hess et al. (1998)에 따르면, 해양-대기 DMS flux는 황산염 에어로졸의 수용성 성분(water-soluble ion)으로 가정하고 있다. 수농도 추정식에 관한 자세한 설명은 2.2절 모델 구성에 제시하였다. OPAC 모델의 광학 특성(광학 변수) 값은 대기복사전달 모델인 SBDART 모델의 입력 자료로 사용되며 이를 통해 지표(surface, SFC), 대기상단(top of the atmosphere, TOA), 대기중(atmosphere, ATM)에서의 직접적 복사강제력을 추정하였다.

OPAC 모델에서 산출된 광학 특성들을 분석하기 위해 월별 특성을 살펴보고 광학 특성 중 하나인 AOD(aerosol optical depth)를 시·공간적으로 분석하였다. DMS flux에서 분석했던 것과 같이 AOD의 연/월/계절 변화를 4° 간격으로 구분하여 살펴보았다. 또한 MODIS (MODERate resolution Imaging Spectroradiometer) AOD 즉, 인위적인 에어로졸과 자연적인 에어로졸이 혼합되어 있는 AOD와 OPAC 모델을 통해 산출된 에어로졸의 AOD 기여율을 추정하였다.



## 2.2. DMS flux 산출 방법

### 2.2.1. 해수 DMS 농도([DMS]<sub>aq</sub>) 산출

일반적으로, 해수는 DMS에 해양에서 과포화 되어 있기 때문에 그 절대량이 해양에서 대기로의 교환 작용의 형태로 DMS flux가 배출되고 있다(Archer et al., 2010). 즉, DMS flux는 DMS 농도와 해양에서 대기로의 전달속도를 이용하여 산출될 수 있다. 본 연구에서는 인공위성 자료 및 모델링 자료를 활용하여 해수 DMS 농도와 해양에서 대기로의 전달속도를 산출한 후 아래와 같이 DMS flux를 산출 하였다.

$$F_{DMS} = k_w[DMS]_{aq} \quad (1)$$

여기서,  $F_{DMS}$ 는 해수에서 대기로의 DMS flux ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ )를 의미하며,  $[DMS]_{aq}$ 는 해수 DMS 농도(nM),  $k_w$ 는 해양에서 대기로의 전달속도(cm/h)를 나타낸다. 해수 DMS 농도는 Chl-a 농도( $\text{mg}/\text{m}^3$ )와 혼합층 두께(Mixed layer depth, MLD (m))를 이용한 DMS 경험적 알고리즘을 통해 추정되며 그 식은 다음과 같다(Simó and Dachs 2002; Gabric et al., 2004).

$$[DMS]_{aq} = -\text{Ln}(\text{MLD})+5.7 \quad \text{Chl-a}/\text{MLD} < 0.02 \quad (2a)$$

$$[DMS]_{aq} = 55.8(\text{Chl-a}/\text{MLD})+0.6 \quad \text{Chl-a}/\text{MLD} \geq 0.02 \quad (2b)$$

연구기간동안(2000~2015년)에 전지구 해역에서 사용된 월별 Chl-a 자료는 NASA (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>)에서 제공하는 9 km 공간 해상도 해상위성의 반사도 자료(Remote-sensing reflectance)를 이용해 동일 클로로필 알고리즘(OC4V6, <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/REPROCESSING/R2009/ocv6>)을 적용하여 클로로필 자료를 생성하였다. 처음 3년간(2000~2002년)은 SeaWIFS

(Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor)의 반사도 자료를 사용하였고 나머지 13년간(2003~2015년)은 MODIS의 반사도 자료를 이용하여 전체 연구기간 동안의 Chl-a 농도를 산출하였다. 한편, 해양에서 대기로의 전달속도(식 3 참조) 산출에 필요한 SSW는 공간해상도가 25 km 이므로 9 km 공간해상도인 Chl-a 자료를 동일한 해상도(25 km)로 맞추는 작업을 하였다. NASA에서 제공하는 SeaDAS (SeaWiFS Data Analysis System)를 사용하여 25 km 해상도의 SMI (Standard Mapped Image) 격자 자료로 재계산하였다(McClain et al., 2004; IOCCG, 2004, 2007). 한편, 동아시아 해역의 2013~2015년 총 3년간의 Chl-a 자료는 공간해상도 4 km인 MODIS 자료로부터 얻어진 8일 합성도(8-day Composite)를 통해 구축하였다.

전지구 해역에서 사용된 MLD 자료는 Ocean Productivity 웹사이트에서 제공하고 있는 모델링 결과 자료이며 DMS 농도 산정 시 사용된 MLD 자료(2000~2015)는 자료의 제한으로 연구기간 내 서로 다르게 이용되었다. 2000년 1월~2004년 12월은 SODA (Simple Ocean Data Assimilation), 2005년 7월~2008년 12월은 FNMOC (The Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center) 자료, 2009년 1월~2015년 12월은 HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model)의 월별 자료를 이용하였다(<http://orca.science.oregonstate.edu/1080.by.2160.monthly.hdf.mld.hycom.php>). 여기서, 2005년 1월~6월까지의 MLD 자료의 부재로 해당 기간은 DMS flux를 산출할 수 없어 분석에서 제외하였다. MLD 자료를 받은 Ocean Productivity 웹사이트에서는 공간해상도가 1/6°로 약 18 km이며 HDF 형식으로 제공하고 있다. 즉, 해수 DMS 농도 산출에 필요한 Chl-a 및 MLD 자료의 공간해상도(각각 25 km, 18 km)가 서로 다르기 때문에 이를 일치시키는 과정을 거치기 위해 컴퓨터 프로그램 (MATLAB, FORTRAN)을 이용하여 MLD의 공간해상도 약 18 km를 25 km로 전환하여 최종적으로 DMS 농도 산출에 이용하였다. 동아시아 해역에서는 연구기간 (2013~2015년)동안 Ocean Productivity 웹사이트에서 제공하고 있는 HYCOM 모델의 8일 자료를 이용하였으며, 공간해상도는 Chl-a 자료와 공간 해상도(4 km)를 일치시키기 위해 컴퓨터 프로그램을 작성하여 수행하였다.

## 2.2.2. 해양에서 대기로의 전달속도( $k_w$ ) 산출

일반적으로, 해양에서 대기로의 전달속도( $k_w$ )는 해상풍(해상 10m 풍속, SSW)과 분자확산도(Schmidt number,  $Sc$ ) 자료로 산출할 수 있다(Liss and Merivat, 1986; Wanninkhof 1992; Gabric et al., 1995, 1996). 본 연구에서는  $k_w$ 를 산출하기 위해 Liss and Merivat (1986) 추정식을 이용하였다.

$$k_w = \alpha 0.17w \quad w \leq 3.6 \quad \dots (3a)$$

$$k_w = \beta(2.85w - 10.3) + 0.61\alpha \quad 3.6 < w \leq 13 \quad \dots (3b)$$

$$k_w = \beta(5.9w - 49.9) + 0.61\alpha \quad w > 13 \quad \dots (3b)$$

여기서,  $w$ 는 해상 10m 풍속인 SSW (m/s)를,  $\alpha = (600/Sc)^{2/3}$ ,  $\beta = (600/Sc)^{1/2}$ 를 의미하며  $Sc = 2674.0 - 147.12(T) + 3.726(T)^2 - 0.038(T)^3$ 이다.  $Sc$  식에 나타난  $T$ 는 해수면 온도인 SST (°C)를 의미한다.

전지구 해역에서 사용된 월별 SST 자료(2000~2015년)는 MODIS 자료의 한계로 처음 2000~2002년은 AVHRR (NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer) 자료, 2003~2015년은 MODIS 자료를 이용하였다(공간해상도 9km). SST 자료가 9 km 공간해상도이므로 SSW 자료와 공간해상도(25 km)를 맞추기 위해 Chl-a와 마찬가지로, NASA SeaDAS 프로그램을 사용하여 25 km 공간해상도의 SMI 격자 자료로 재산정하였다(McClain et al., 2004; IOCCG, 2004, 2007). 월별 SSW 자료는 2000~2007년은 QuikSCAT (Quick Scatterometer)에서, 이후 센서 고장으로 인해 2008~2015년은 ASCAT (Advanced Scatterometer)에서 관측한 자료를 이용하였는데, 이 자료는 IFREMER (<ftp://ftp.ifremer.fr>)에서 제공하는 Level 3 자료로 공간해상도는 25 km이다. 한편, 동아시아 해역에서 사용된 SST(2013~2015년)는 8일간 합성된 MODIS 자료를 그리고 SSW는 ASCAT의 월별자료를 8일 자료로 전환하여 이용하였다. 또한 공간해상도는 모두 4 km로 구성하였다. 따라서 최종적으로 앞서 설명한 해수 중 DMS 농도와 해양에서 대기로의 전달속도를 곱하여 전지구 및 동아시아 해역의 DMS flux(식 1 참조)를 산출하였다.

## 2.3. 모델 구성

### 2.3.1. 광학 모델

본 연구에서는 DMS 관련 에어로졸(DMS-related aerosol) 즉, 황산염에 의한 에어로졸의 광학특성을 산출하기 위하여 OPAC 모델을 이용하였다. Hess et al. (1998) 논문에 따르면, OPAC 모델은 파장과 상대습도의 조건에 따라 에어로졸 및 구름 성분의 광학특성(흡수계수(extinction coefficient,  $\sigma_{ex}$ ), 산란계수(scattering coefficient,  $\sigma_{sc}$ ), 소산계수(absorption coefficient,  $\sigma_{ab}$ ), AOD(aerosol optical depth), 단일산란알베도(single scattering albedo), 위상함수(phase function) 등)과 미세 물리학적 특성을 산출하는 모델이다. 또한 에어로졸 및 water clouds에 대하여 61개 파장(0.25~40  $\mu\text{m}$  범위), ice clouds에 대하여 67개 파장(0.28~40  $\mu\text{m}$  범위)에 해당하는 광학특성의 산출이 가능하며 8 개의 상대습도(0%, 50%, 70%, 80%, 90%, 95%, 98%, 99%) 중 선택할 수 있다. OPAC 모델은 에어로졸의 성분에 기초하여 대륙, 도시, 사막, 해양, 북극, 남극 에어로졸로 분류하여 수행 할 수 있고 10개 유형의 에어로졸 성분 (insoluble, water-soluble, BC (black carbon), sea-salt 2개, mineral dust 4개, sulfate)와 6개 유형의 water clouds (stratus 2개, cumulus 3개, fog), 3개 유형의 ice clouds(-25  $^{\circ}\text{C}$ , -50  $^{\circ}\text{C}$ , <-50  $^{\circ}\text{C}$ )에 대하여 각각의 광학특성을 산출할 수 있다(Hess et al., 1998).

본 연구에서는 DMS 관련 에어로졸(DMS-related aerosol) 즉, 황산염 에어로졸의 광학 특성을 추정하기 위하여 동아시아 해역에서 산출된 DMS flux를 수농도(number density)로 전환하여 OPAC 모델의 입력 자료로 사용하였다. 여기서, 대기 중 배출된 DMS flux는 여러 산화 과정과 화학 반응을 통해 수용성 에어로졸인 황산염으로 생성된다. 따라서 청정한 해양 대기라는 가정 하에 수용성 에어로졸의 표준 수농도인 1500  $\text{cm}^{-3}$ 를 각 위경도 격자에 적용하여 최종 DMS flux의 수농도를 계산하였다(즉,  $\text{DMS flux} \times 1500 / \text{Total mean DMS flux}$ )(Hess et al., 1998). 파장은 단파장 영역인 총 24개 파장(0.3~4.0  $\mu\text{m}$  범위)에 대한 광학

특성(소산계수, 산란계수, 흡수계수, AOD, 이상함수 등)을 산출하였다. 황길영 등 (2008)에서는 2년간(2004년 6월~2006년 6월) 동아시아 해역 내에 위치한 이어도 해양과학기지에서 관측된 상대습도는 봄철에  $81.4\pm 10.7\%$ , 여름철은  $83.8\pm 4.1\%$ , 가을철과 겨울철은 각각  $62.6\pm 7.0\%$ ,  $63.7\pm 7.9\%$ 으로 나타났으며, 박성화 등 (2009)에서는 2008년 6월 24일~7월 25일까지의 이어도 관측기지의 상대습도는 평균 92.9 %(범위 81~98 %)으로 보고된 바 있다. 이러한 선행 연구를 바탕으로 상대습도를 해양조건을 고려하여 80 %로 선택하여 OPAC 모델을 수행하였다. 에어로졸의 연직 프로파일은 해당 연구지역인 동아시아 해역 측정의 부재로 모델 내장된 기본 값을 이용하였으며 에어로졸 화학성분의 수직분포가 경계층 내에서 균일한 것으로 가정하였다.

### 2.3.2. 대기복사전달 모델

본 연구에서는 황산염 에어로졸의 직접적 복사강제력(Direct radiative forcing, DRF)을 추정하기 위하여 미국 Santa Barbara에 있는 캘리포니아 대학교에서 개발된 대기복사전달 모델인 SBDART 모델을 이용하였다. SBDART 모델은 단파 영역 0.25~4.0  $\mu\text{m}$ , 장파 영역 4.0~100  $\mu\text{m}$ , 전 파장영역 0.25~100  $\mu\text{m}$ 에서 DISORT (Discrete ordinate method)를 기반으로 하여 맑거나 흐린 하늘 조건에서 지구 대기 내부와 표면의 평행-평면 복사 전달을 계산하는 모델이다(Ricchiazzi et al., 1998). 모델링 수행을 위한 입력 변수 및 조건들은 INPUT 파일 내에서 지정되어 복사강제력을 산출하기 위한 조건으로 이용되며 본 연구에서 복사강제력 산출시 이용된 INPUT 파일을 Table 1에 나타냈다. INPUT 파일 외에도 사용자에 의해 추가로 이용 가능한 파일(atms.dat, aerosol.dat, albedo.dat, filter.dat 등)이 있다. 본 연구에서는 에어로졸에 의한 복사강제력을 추정하기 위해 'aerosol.dat' 파일을 추가로 생성하였으며 이 파일은 OPAC 모델에서 추정된 단일산란알베도, AOD, 위상함수 등을 입력 자료로 사용하였다. 또한 SBDART 모델에서는 기본적으로 하나의 지점과 하나의 시간대에 대해서 복사강제력을 산출하게끔 되어 있는데, 본 연구에서는 시·공간적으로 동시에 모델링을 수행하기 위해 'latlon.dat' 파일을 생성하여 프로그램을 수행하였으며 이 파일에는 날짜, 위도, 경도를 필요로 한다.

복사강제력을 추정하기 위해 상기에서 언급한 모델 구성 이외에도 다음과 같은 조건들을 통해 모델링을 수행하였다. 먼저, 단파장 영역에 속하는 0.3~4.0  $\mu\text{m}$  범위(총 24 개)의 파장으로 지정하였고 대기 프로파일은 동아시아 관측자료 부재로 인해 모델 내에서 동아시아 해역과 가장 유사한 US62(미국표준대기) 프로파일을 이용하였다. 또한 에어로졸의 영향만을 살펴보기 위해 오염물질은 모델 내에서 default 값(-1)으로 처리하였으며(Table 1), 구름이 없는(레이리 대기) 맑은 하늘 조건으로 가정하여 모델링을 수행하였다. 복사강제력 단위는 단위 면적당 입사하는 빛 에너지로  $\text{W}/\text{m}^2$ 으로 복사강제력 추정은 에어로졸이 있는 경우와 없는 경우로 구분하였다. 또한 복사강제력 추정에 있어 지표(surface, SFC), 대기상단(top of the

atmosphere, TOA), 대기 중(atmosphere, ATM)으로 분류하여 Downward flux와 Upward flux를 추정하였으며, 다음과 같은 식을 사용하였다.

지표 및 대기상단의 복사강제력은( $DRF_{SFC}$ ,  $DRF_{TOA}$ ) 에어로졸이 있는 경우의 복사플럭스와 에어로졸이 없는 경우(즉,  $AOD=0$ )의 복사플럭스의 차로 계산이 되며, 각 복사강제력은 net flux 즉 ‘downward flux ( $F^{\downarrow}$ )-upward flux ( $F^{\uparrow}$ )’로 계산된다. 또한 대기 중의 직접적 복사강제력( $DRF_{ATM}$ )은 대기상단(TOA)의 직접적 복사강제력과 지표(SFC)의 직접적 복사강제력의 차로 계산된다. 이를 계산식으로 나타내면 다음과 같다.

$$DRF_{TOA,SFC} = (F^{\downarrow} - F^{\uparrow})_{TOA,SFC} - (F_{w/o}^{\downarrow} - F_{w/o}^{\uparrow})_{TOA,SFC} \quad \dots\dots (4a)$$

$$DRF_{ATM} = DRF_{TOA} - DRF_{SFC} \quad \dots\dots (4b)$$

여기서,  $F$ 는 대기 중 에어로졸이 있는 경우의 복사플럭스를 나타내며,  $F_{w/o}$ 는 에어로졸이 없는 경우의 복사플럭스를 의미한다.

Table 1. Example of 'INPUT' file namelist in SBDART model.

```

&INPUT
  isat = 0,
  nf = 2,
  wlinf = 0.3,
  wlsup = 4.0,
  wlinc = 0.05,
  sza = 0,
  csza = -1,
  iday = $iday,
  time = 3,
  alat = $alat
  alon = $alon
  isalb = 4,
  idatm = 6,
  uw = -1,
  uo3 = -1,
  xn2 = -1,
  xo2 = -1,
  xco2 = -1,
  xch4 = -1,
  xn2o = -1,
  xco = -1,
  xnh3 = -1,
  xso2 = -1,
  xno = -1,
  xhno3 = -1,
  xno2 = -1,
  lwp = 0.0,
  nre = 8,
  jaer = 1,
  iaer = -1,
  zout = 0, 100,
  iout = 11,
  nstr = 4,

```

'latlon.dat' file = iday, alat, alon  
 \* iday = monthly julian day  
 \* alat = latitude  
 \* alon = longitude



### Ⅲ. 결과 및 고찰

#### 3.1. 전지구 DMS flux의 시·공간 변화 및 장기 추세 분석

본 절에서는 전체적인 DMS flux의 장기변동 추세 및 주요 인자를 16년간(2000~2015년) 전지구 영역에 대해 DMS flux 및 주요 요소(SST, SSW, Chl-a, DMS)들의 시·공간 특성을 살펴보았다(식 (1) 참조). Fig. 1은 전지구 해역에서의 연구기간(2000~2015년)동안의 연평균 DMS flux의 공간분포를 나타낸다. 자료 및 방법(2.2절)에서 언급한 바와 같이, 2005년에는 MLD 자료가 6개월 동안 없는 관계로 모든 분석에서 2005년을 제외하였다.

전지구 해역에서의 공간분포는 대부분 중위도( $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ )보다 저위도( $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ )에서 DMS flux가 많이 분포하고 있으며, 대부분 남아메리카 북쪽에 위치한 카리브해 연안( $0^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ,  $45^{\circ}\text{W}\sim 75^{\circ}\text{W}$ )과 아프리카 북서부에 위치한 모리타니아 연안( $10^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$ ,  $15^{\circ}\text{W}\sim 30^{\circ}\text{W}$ ), 중동 남쪽에 위치한 아라비아해 ( $0^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ,  $40^{\circ}\text{E}\sim 60^{\circ}\text{E}$ ) 등의 해역에서 DMS flux가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 공간분포는 과거 1972~1998년 동안 전지구 여러 해역에서 추정된 DMS flux의 연평균 분포와 서로 유사한 패턴을 보였다(Kettle and Andreae 2000; Kloster et al. 2006). 2000년부터 2015년까지의 DMS flux의 연평균 값은  $1.14\pm 1.77$ (2000년),  $1.12\pm 1.73$ (2001년),  $1.05\pm 1.69$ (2002년),  $1.06\pm 1.66$ (2003년),  $1.01\pm 1.90$ (2004년),  $1.08\pm 1.93$ (2006년),  $1.12\pm 1.99$ (2007년),  $1.09\pm 2.01$ (2008년),  $0.94\pm 1.57$ (2009년),  $1.08\pm 1.61$ (2010년),  $0.97\pm 1.61$ (2011년),  $0.88\pm 1.49$ (2012년),  $0.94\pm 1.52$ (2013년),  $0.91\pm 1.63$ (2014년),  $0.87\pm 1.56$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ (2015년)으로 2000년부터 약간의 감소 및 증가를 반복했지만 전체적인 추세를 보았을 때 점차 감소하는 경향이 나타난다. 연평균 DMS flux는 2001년  $1.12\pm 1.73$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로 가장 높게, 2015년에는  $0.87\pm 1.56$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로 가장 낮게 추정되었다.

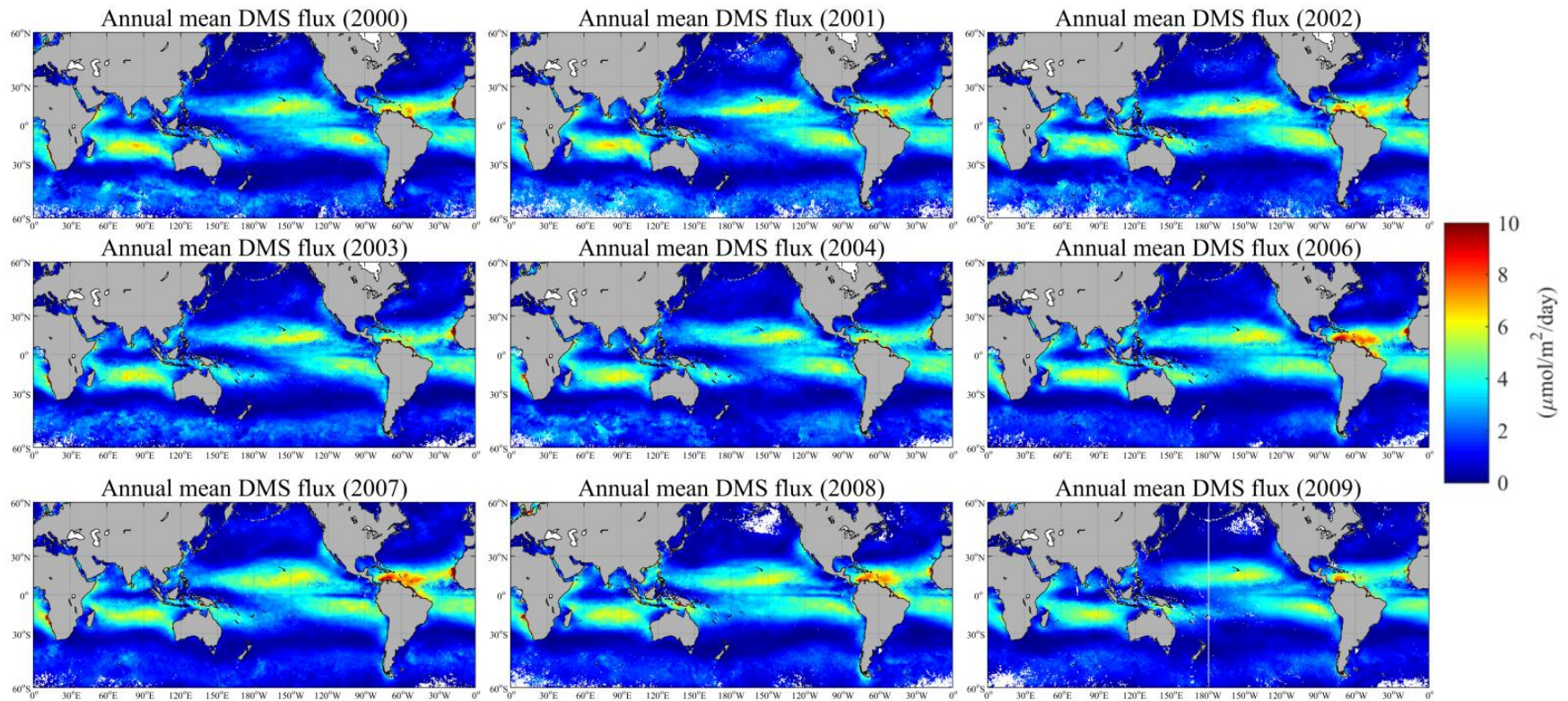


Fig. 1. Spatial distributions of annual mean DMS flux ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ) during 2000–2015. The DMS flux in 2005 was excluded due to the unavailability of MLD for calculation the DMS flux during January through June in 2005.

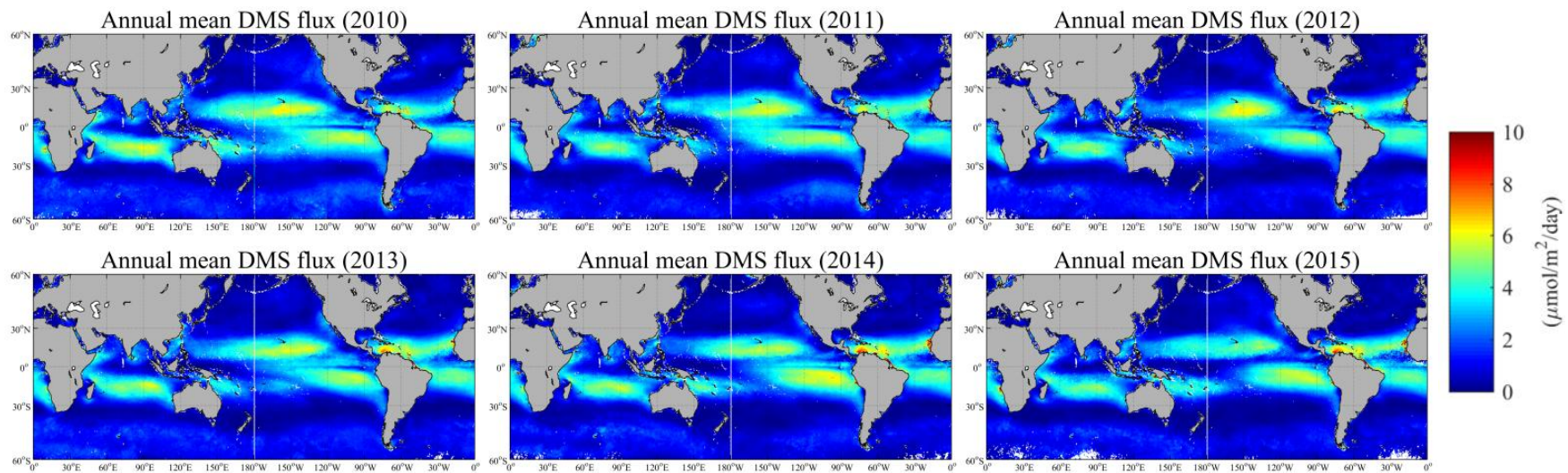


Fig. 1. (Continued.)

Fig. 2는 연구기간(2000~2015)동안의 위도 구간별(10° 간격) DMS flux와 관련 요소(SST, SSW, Chl-a, DMS)의 연변화 시계열을 나타낸다. Fig. 2의 연평균 값을 보면 DMS flux는 북반구와 남반구 모두 2000년에서 2015년으로 올수록 미세하게 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 1의 공간분포와 마찬가지로 대체로 북반구 남반구 모두 저위도(0°~30°)에서 DMS flux 값이 높고 중위도(30°~60°)에 가까울수록 값이 낮은 것으로 나타났다(남반구 30°S~40°S 제외). 그 중 북반구와 남반구 모두 10°~20° 구간이 가장 높았고 북반구 50°N~60°N, 남반구 30°S~40°S 구간이 가장 낮게 나타났다.

연도별로 살펴보면, 북반구에서 2007년에 평균  $2.23 \pm 3.04 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로 가장 높게 나타난 반면 2015년에는  $1.64 \pm 2.16 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로 가장 낮게 추정되었다. 남반구에서는 2001년에 약  $2.05 \pm 1.61 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로 가장 높고 2015년에  $1.53 \pm 1.57 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로 가장 낮게 나타났다. DMS flux가 가장 높게 나타난 10°~20° 위도 구간에서 북반구는 2006년과 2007년에 각각  $4.19 \pm 2.69$ ,  $4.13 \pm 3.13 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 로 가장 높게, 남반구에서는 2006년과 2007년에 각각  $3.69 \pm 1.35$ ,  $3.68 \pm 1.37 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 로 가장 높게 나타났다. 그 다음은 북반구에서 2002년과 2008년에 각각  $4.08 \pm 2.29$ 와  $3.94 \pm 3.04 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 로, 남반구는 2010년, 2002년, 2008년에  $3.66 \pm 1.19$ ,  $3.65 \pm 1.48$ ,  $3.64 \pm 1.33 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 로 높게 나타났다. 북반구의 가장 낮은 위도 구간인 50°N~60°N에서는 2009년에  $0.36 \pm 0.58 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로 가장 낮게, 남반구 30°S~40°S에서는 2015년에  $0.33 \pm 0.37 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 로 가장 낮게 추정되었다.

위와 같이 DMS flux가 북반구 10°N~20°N 위도 구간에서 2006년, 2007년, 2002년, 2008년과 남반구 10°S~20°S 위도 구간에서 2006년, 2007년, 2010년, 2002년, 2008년에 높게 나타난 원인은 위와 같은 연도에 같은 위도 구간에서 SSW(6 m/s 이상)와 SST(26°C 이상) 증가로 인해 대기로의 전달속도가 증가함으로써 DMS flux 역시 높게 나타난 것으로 추정된다. 연구기간 동안 전지구 해역에서 SSW와 SST의 상관관계를 살펴 본 결과, SSW는  $r=0.687$ 으로 SST는  $r=0.685$ 으로 강한 양의 상관관계를 보이고 통계적으로 유의하게 나타났다(그림 제외). 이미 여러 선행연구에서도 풍속과 DMS flux의 양의 상관관계를 나타낸 연구결과가 발표된 바 있으며(Saltzman et al., 1993; Andreae et al. 1994; 김기현

등, 1997) 이는 SSW가 강하고 비교적 SST가 높을수록 전달속도가 높아짐으로써 DMS flux가 높아질 수 있다는 것을 시사한다.

한편, 위도 구간별로 살펴보면 DMS flux와 유사하게 SST와 SSW는 저위도에서 높고 중위도에서 낮은 위도구간을 나타내고 있지만(SSW 남반구 제외), SSW 남반구에서는 중위도에서(40°S~50°S, 50°S~60°S) 비교적 높은 풍속(약 6~8 m/s)이 나타났음에도 불구하고 DMS flux는 상대적으로 높게 나타나지 않았다. 이는 이 위도 구간에서 높은 SSW가 나타났음에도 불구하고 상대적으로 낮은 SST로 인해 해양에서 대기로의 전달속도가 감소하여 DMS flux가 비교적 낮게 추정된 것으로 판단된다.

Chl-a 농도와 DMS 농도는 저위도에서 높게 나타난 DMS flux와 달리 중위도에서 높게 나타나고 있다(DMS 남반구 제외). 연구기간동안 전지구 해역에서 DMS flux와 Chl-a의 상관관계는  $r=-0.399$ 으로 음의 상관관계, DMS는  $r=0.176$ 으로 양의 상관관계로 통계적으로 유의하게 나타났다(그림 제외). 선행연구 결과에 따르면, DMS 생성에 기여하는 것은 Chl-a 농도 자체보다 클로로필(Chl)의 종 조성비(와편모조류와 규조류)가 주요 원인인 것으로 밝혀진 바 있다(Keller et al. 1989; Yang et al. 2014). 따라서 종 조성비에 따라 DMS 생성량이 달라져 최종적으로 DMS flux가 달라질 수 있으므로 DMS flux와 다른 양상을 보인 것으로 판단된다. 또한 DMS flux와 Chl-a의 공간분포를 보면(그림 제외) 저위도 연안에서 높은 값을 보이고 있으나 중위도에서 낮은 DMS flux와 달리 상대적으로 Chl-a 농도는 높은 값을 나타내고 있기 때문에 전체적으로 봤을 때 음의 상관관계로 나타난 것으로 추정된다.

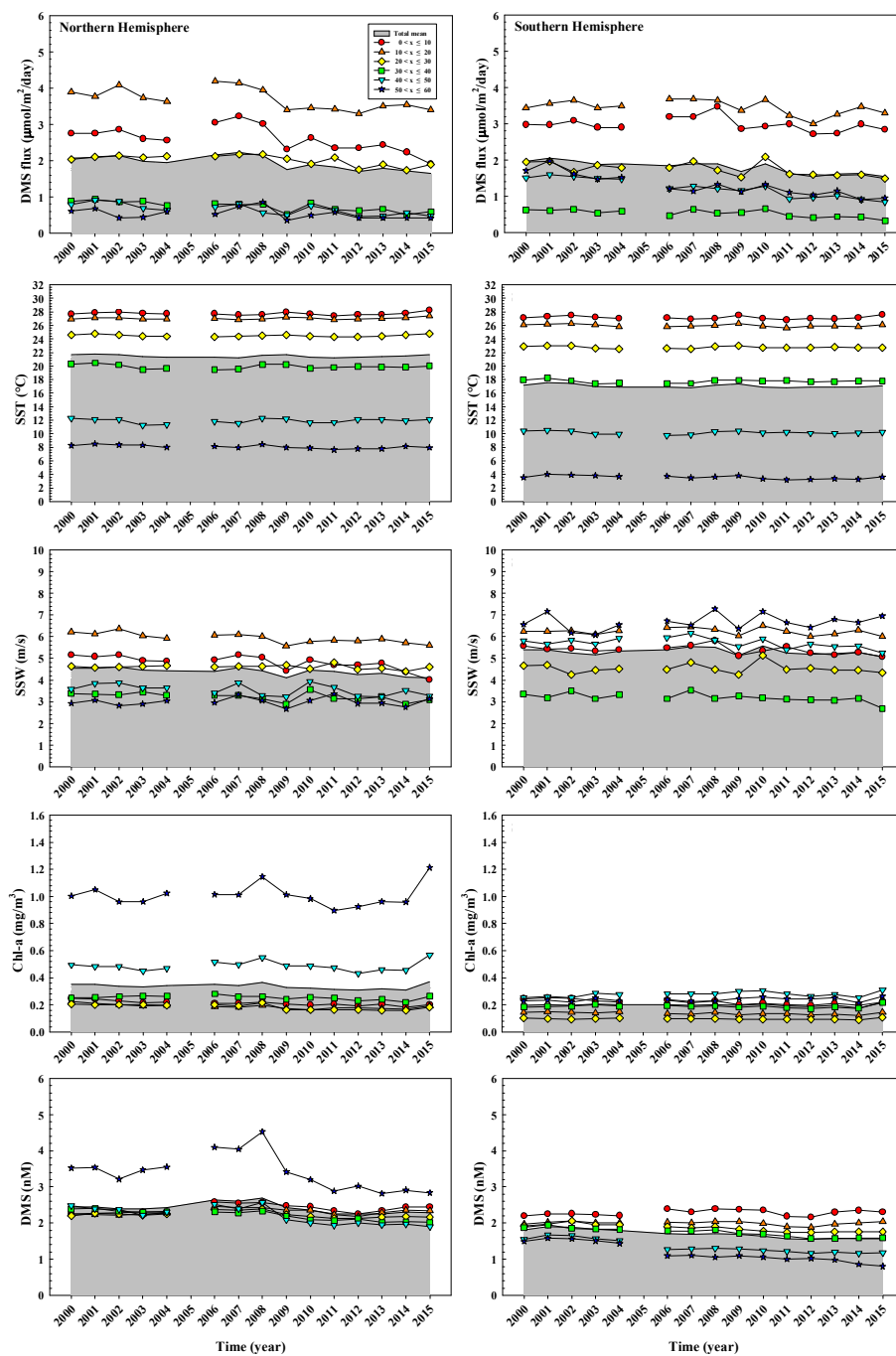


Fig. 2. Yearly variations in DMS flux, SST, SSW, Chl-a, and DMS concentrations for each latitude band ( $10^\circ$  interval between  $0^\circ$  and  $60^\circ$ ) during the study period (2000–2015). Their values in 2005 were excluded due to the unavailability of MLD during January through June in 2005.

연구기간 동안(2000~2015년) 위도 구간별(10° 간격) DMS flux와 관련 요소(SST, SSW, Chl-a, DMS)의 월변화를 살펴보았다(Fig. 3). DMS flux를 월별로 살펴보면 북반구에서는 겨울철 12월에  $2.61 \pm 2.91 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로, 남반구에서는 여름철 6월에  $2.12 \pm 2.17 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로 가장 높게 나타났다. 그 다음으로 북반구는 1월과 7월에 각각  $2.39 \pm 3.35$ ,  $2.37 \pm 3.78 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로 남반구는 2월과 1월에 각각  $2.05 \pm 1.67$ ,  $1.95 \pm 1.64 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로 높게 나타났으며 낮게 나타난 월은 두 반구 모두 10월에 각각  $1.72 \pm 2.39$ ,  $1.48 \pm 1.92 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 이었다. 위도별로 살펴보면, 두 반구 모두 대부분의 저위도 구간에서 높고 중위도 구간에서 낮게 나타났다. 특히, DMS flux 값이  $10^\circ \sim 20^\circ$  대부분의 위도 구간에서 가장 높게 나타나고  $50^\circ \sim 60^\circ$  위도 구간에서 가장 낮게 나타났다.

이러한 DMS flux의 월변화는 다른 요소들 중 SSW가 가장 유사하게 같은 위도 구간에서 높고 낮음이 나타났다. 예를 들면, DMS flux는  $10^\circ\text{N} \sim 20^\circ\text{N}$ 에서 12월을 제외하고도 1월, 2월, 6월, 11월에 상대적으로 높았고 두 번째로 높은 위도 구간인  $0^\circ\text{N} \sim 10^\circ\text{N}$ 에서 4월, 10월에 감소하는 경향을 보였는데 SSW 역시 이와 같은 위도 구간에서 높고 낮았으며 이는 SSW가 DMS flux 증가에 기여한 것으로 판단된다. 한편, SST는 저위도에서 높고 중위도에서 낮은 유사한 경향을 보였으나 DMS flux에서 높게 나타난 12월, 1월, 2월 등 겨울철에 SST는 비교적 낮게 나타났으며 Chl-a와 DMS도 DMS flux와 위도 구간별로 잘 맞지 않았다.

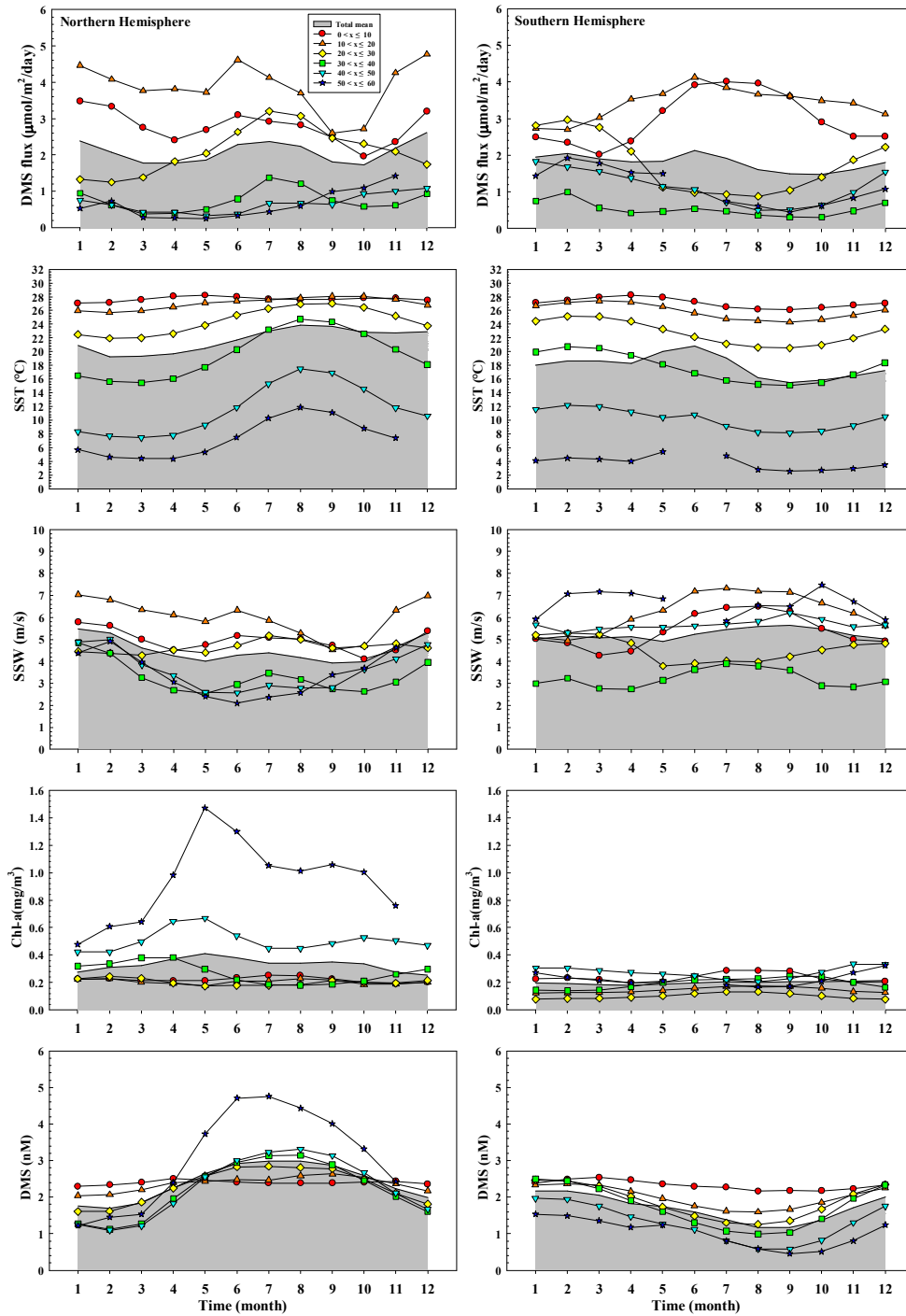


Fig. 3. Monthly variations in DMS flux, SST, SSW, Chl-a, and DMS concentrations for each latitude band ( $10^{\circ}$  interval between  $0^{\circ}$  and  $60^{\circ}$ ) during the study period (2000-2015).



전지구 해역에서의 DMS flux를 북반구와 남반구를 구분하여 연평균 변화를 살펴 보았다(Fig. 4). DMS flux의 북반구와 남반구의 연평균을 보면, 북반구가 다소 높았 으며 DMS flux를 공간적으로 살펴보았을 때 대체로 외해보다 저위도 연안지역에 가까울수록 높은 DMS flux가 나타나는 것을 확인하였다(Fig. 1 참조). 이는 연안에 서 외해보다 수심이 낮고 영양염이 풍부하기 때문에 Chl-a 농도 및 DMS 농도 역 시 외해에 비해 연안에서 높아져 DMS flux 역시 영향을 받은 것으로 추정된다(장 풍국 등 2005; Yang et al. 2014). 따라서 육지가 많은 북반구에서 남반구보다 상대 적으로 DMS flux가 높아진 것으로 추정될 수 있다. 전반적으로, 연구기간 동안의 두 반구(북반구, 남반구)의 감소추세는 북반구는  $Q=-0.029 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day per year}$ 으 로 남반구는  $Q=-0.030 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day per year}$ 으로 감소추세는 거의 유사하게 나타 나는 것을 확인 할 수 있다.

연구기간(2000~2015년)동안의 장기간 추세를 공간적으로 살펴보기 위해, 전지구 격자별로 산출된 월별 DMS flux 및 관련요소(SST, SSW, Chl-a, DMS)를 이용하여 각각의 기울기(slope)를 산출하였다(Fig. 5). 그림에 나타난 점(dot)은 90% 신뢰 구간에서의 통계적 유의성을 의미한다. DMS flux의 공간분포에서는 두 반구 모두 대체로 감소추세가 분포하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 특히, 중동 남쪽에 위치한 아라비아해( $0^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ,  $40^{\circ}\text{E}\sim 60^{\circ}\text{E}$ )와 아프리카 북서부에 위치한 모리타니아 연안 ( $10^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$ ,  $15^{\circ}\text{W}\sim 30^{\circ}\text{W}$ )에서 감소추세가 크게 나타나는 것으로 보인다. 증가 추 세를 보이는 해역은 남아메리카 북쪽에 위치한 카리브해 연안( $0^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ,  $45^{\circ}\text{W}\sim 75^{\circ}\text{W}$ ), 남아메리카 브라질 북쪽 연안(적도 부근,  $35^{\circ}\text{W}\sim 50^{\circ}\text{W}$ ), 남아메리카 브라질 동쪽 연안( $5^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{S}$ ,  $30^{\circ}\text{W}\sim 35^{\circ}\text{W}$ 과  $20^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{S}$ ,  $35^{\circ}\text{W}\sim 45^{\circ}\text{W}$ ), 중국 보하이해와 황해 연안( $30^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$ ,  $120^{\circ}\text{E}\sim 125^{\circ}\text{E}$ ), 서남아시아의 연안( $20^{\circ}\text{N}$ ,  $60^{\circ}\text{E}$ ) 등에서 나타 났다. 또한 외해에서는 북태평양(각각  $15^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$ ,  $150^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{W}$ )과 남태평양 저위 도( $0^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{S}$ ,  $160^{\circ}\text{E}\sim 80^{\circ}\text{W}$ )에서 일부 증가추세가 나타났다.

이러한 장기 추세 공간분포는 북태평양 및 남태평양 저위도 해역에서 증가 추세 등 SSW와 DMS 농도가 가장 유사한 분포를 보였지만 SSW는 북아메리카 부근 대서양과 호주 남쪽 해역, DMS 농도는 태평양 적도 해역과 멕시코만 등 일부 해역에서 공간분포가 일치하지 않았다. 또한 SST는 DMS flux와 다르게 북서태평양과 대서양에 위치한 캐나다 동쪽인근 해역을 제외한 모든 해역에서

광범위하게 증가 추세를, 남반구에서는 인도양에서 광범위하게 증가 추세가 나타났다. Chl-a 농도도 DMS flux와 반대로 대부분 저위도에서 감소 추세를 보이고 중위도에서는 증가 추세가 나타나 DMS flux와 해역별 추세가 불일치하게 나타난 것으로 판단되며, 전지구 장기 추세에서는 SSW와 DMS가 가장 추세가 유사하게 나타나 두 요소가 복합적으로 작용하여 장기적으로 DMS flux에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

연구기간(2000~2015년)동안 전지구 해역에서의(북반구, 남반구) 위도 구간별(10° 간격) 및 계절별로 DMS flux의 연평균 증가 및 감소 추세를 분석하기 위해 MK 검정을 수행하였다(Table 2). 북반구에서는 평균  $-0.029(-0.001 \sim -0.036)$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day per year}$ , 남반구에서는  $-0.030(-0.011 \sim -0.051)$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day per year}$  으로 감소 추세가 나타났으며 통계적으로 유의한 것으로 나타난다(10°N~20°N, 40°N~60°N와 10°S~30°S 제외). 계절별로 보면, 북반구는 겨울철 일부 위도 구간을 제외하고 대부분 위도 구간에서 감소 추세가 나타나며 저위도에서 크게 감소하는 경향을 보였다. 예를 들면, 봄철은 저위도인 0°N~10°N 위도 구간에서  $-0.044$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day per year}$ , 여름철은 20°N~30°N 위도 구간에서  $-0.064$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day per year}$ , 가을철은 10°N~20°N 위도구간에서  $-0.042$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day per year}$ , 겨울철은 0°N~10°N 위도 구간에서  $-0.052$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day per year}$  으로 가장 크게 감소 추세가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이와 반대로 북반구 겨울철은 20°N~30°N 위도 구간에서  $+0.030$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day per year}$ , 10°N~20°N 위도 구간에서  $+0.006$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day per year}$ 으로 약간의 증가추세를 보였다. 남반구에서는 대부분의 계절의 위도 구간에서 감소하는 추세였으며(여름철 10°S~20°S 위도 제외) 북반구와 달리 중위도에서 감소추세가 크게 나타났다. 예를 들면, 남반구 50°S~60°S에서 봄철에는  $-0.054$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day per year}$ , 여름철은  $-0.025$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day per year}$ , 가을철은  $-0.040$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day per year}$  으로 나타나며 반면 겨울철 40°S~50°S 위도 구간에서  $-0.074$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day per year}$ 으로 크게 감소하는 경향을 보였다.

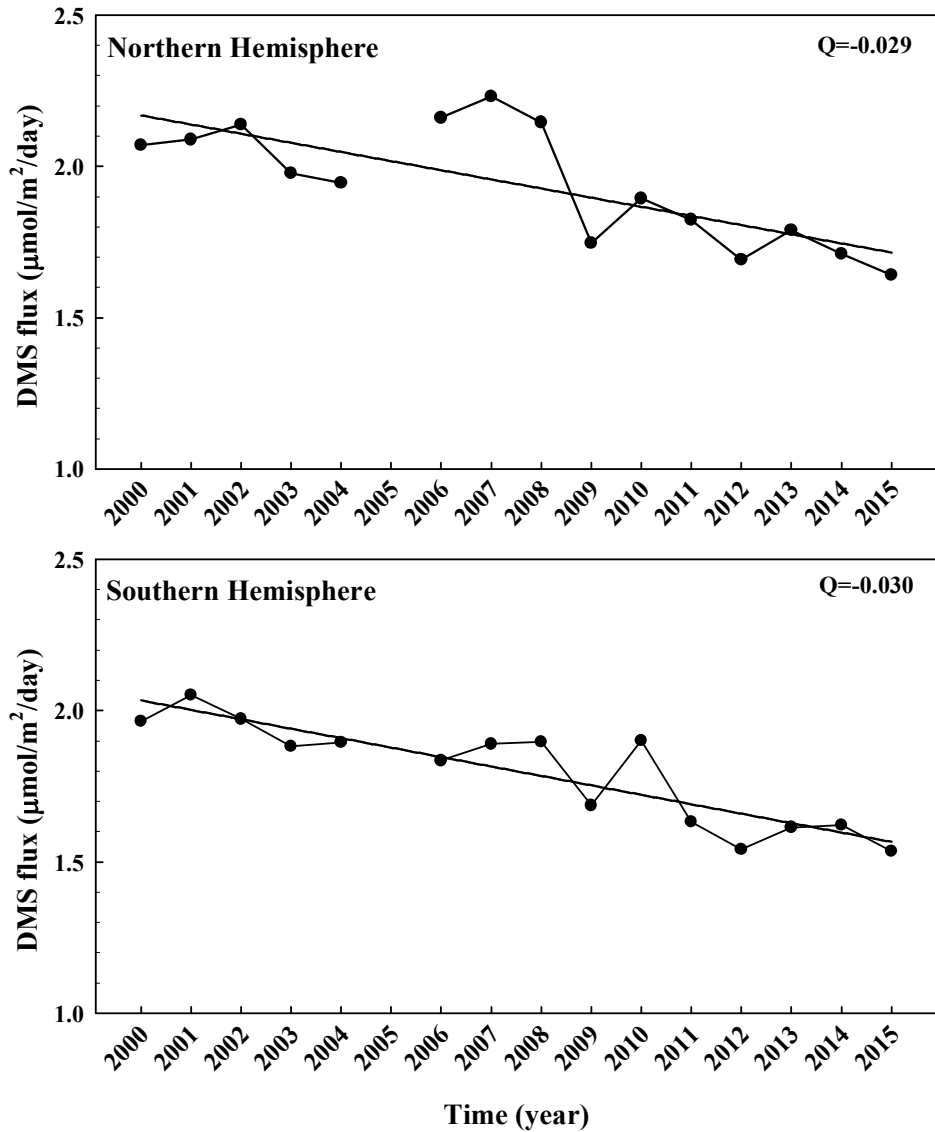


Fig. 4. Yearly variations in the global sea-to-air DMS flux ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ) calculated in the Northern and Southern Hemisphere during the study period (2000-2015). The DMS flux in 2005 was excluded due to the unavailability of MLD for calculation the DMS flux during January through June in 2005.

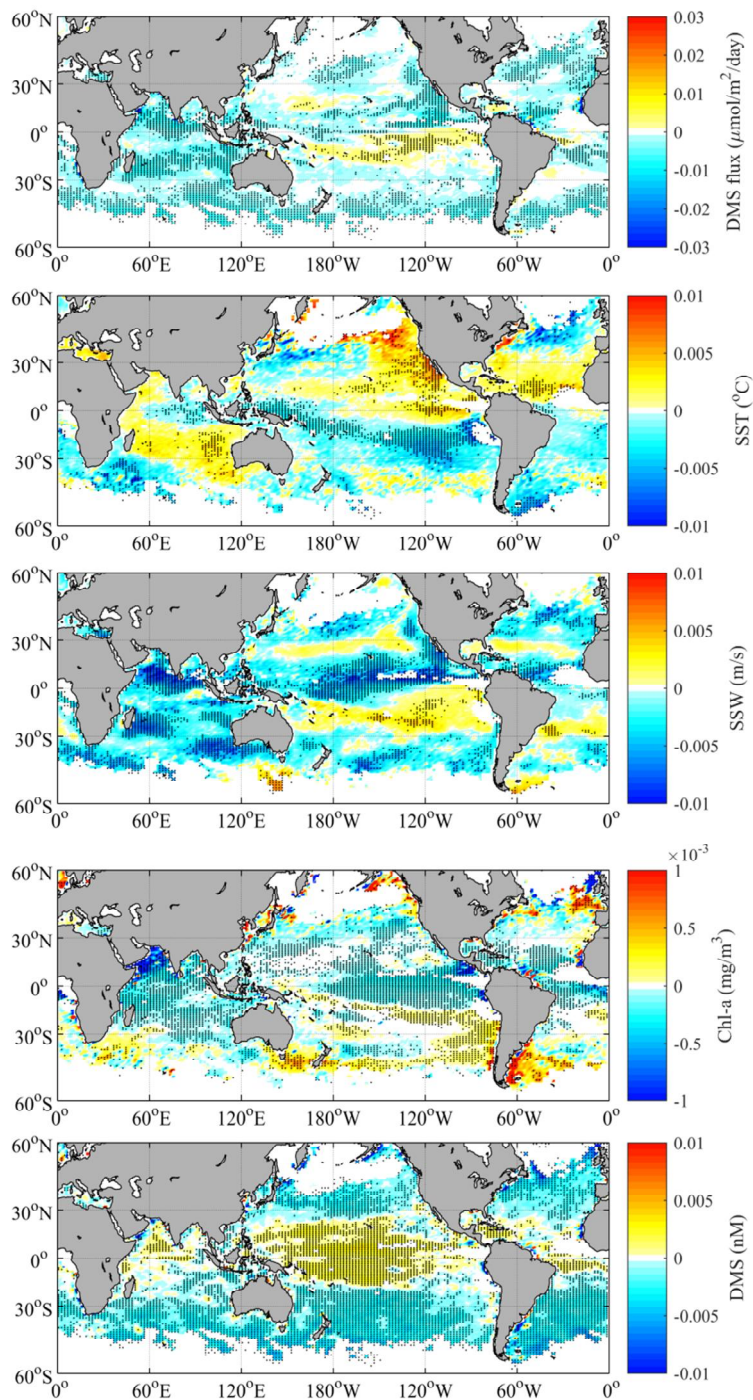


Fig. 5. The linear trends in DMS flux, SST, SSW, Chl-a, and DMS concentrations over 2000–2015, which were derived from single variable linear regressions of the DMS flux, SST, SSW, Chl-a, and DMS using their monthly data. The dots indicate the significant values at the 90% confidence level.

Table 2. Summary of Mann–Kendall (MK) statistics of DMS flux for each latitude band (10° interval between 0° and 60°) over the global ocean during the study period (2000–2015).

Latitude	ALL		Spring		Summer		Fall		Winter	
	Q <sup>a</sup>	p <sup>b</sup>	Q	p	Q	p	Q	p	Q	p
Northern hemisphere	<b>-0.029</b>	0.010	<b>-0.020</b>	0.001	<b>-0.044</b>	0.003	-0.036	0.441	<b>-0.008</b>	0.006
50–60	-0.001	0.960	-0.001	0.764	-0.005	0.298	-0.032	0.298	-0.013	0.380
40–50	-0.013	0.052	<b>-0.010</b>	0.023	<b>-0.024</b>	0.017	<b>-0.041</b>	0.003	<b>-0.030</b>	0.030
30–40	<b>-0.028</b>	0.002	<b>-0.012</b>	0.010	<b>-0.037</b>	0.002	<b>-0.029</b>	0.001	-0.019	0.110
20–30	<b>-0.024</b>	0.001	-0.009	0.764	<b>-0.064</b>	0.003	<b>-0.035</b>	0.042	0.030	0.300
10–20	-0.019	0.052	-0.028	0.075	<b>-0.057</b>	0.005	<b>-0.042</b>	0.027	0.006	0.820
0–10	<b>-0.036</b>	0.021	<b>-0.044</b>	0.010	<b>-0.060</b>	0.006	-0.040	0.064	<b>-0.052</b>	0.040

Latitude	ALL		Spring		Summer		Fall		Winter	
	Q <sup>a</sup>	p <sup>b</sup>	Q	p	Q	p	Q	p	Q	p
Southern hemisphere	<b>-0.030</b>	0.001	-0.033	0.078	<b>-0.013</b>	0.005	<b>-0.027</b>	0.002	<b>-0.038</b>	0.001
0–10	<b>-0.043</b>	0.034	-0.016	0.322	-0.001	0.960	-0.006	0.390	-0.016	0.260
10–20	-0.011	0.190	<b>-0.024</b>	0.048	0.022	0.136	-0.019	0.162	-0.025	0.190
20–30	-0.016	0.222	<b>-0.034</b>	0.017	0.000	1.000	-0.016	0.052	-0.028	0.090
30–40	<b>-0.026</b>	0.034	<b>-0.014</b>	0.010	<b>-0.018</b>	0.008	<b>-0.014</b>	0.001	<b>-0.024</b>	0.020
40–50	<b>-0.016</b>	0.003	<b>-0.047</b>	0.004	-0.021	0.136	<b>-0.031</b>	0.001	<b>-0.074</b>	0.005
50–60	<b>-0.051</b>	<0.001	<b>-0.054</b>	0.003	<b>-0.025</b>	0.029	<b>-0.040</b>	0.001	<b>-0.058</b>	0.010

<sup>a</sup> Q is a slope of long-term trend calculated using the non-parametric Sen's method.

<sup>b</sup> Probability (95% confidence interval).

source: Choi et al. (2017)

## 3.2. 동아시아 DMS flux의 시·공간적 변화

### 3.2.1. 연변화

동아시아 해역에서 황산염 에어로졸(즉, DMS-related 에어로졸)의 직접적 복사강제력을 추정하기 위한 초기 작업으로 먼저 3년간 (2013~2015년) 동아시아 해역에서 DMS flux를 산출하였다(식(1) 참조). 연구기간동안 산출된 연평균 DMS flux 공간분포와 DMS flux 산출에 이용된 주요 요소(SST, SSW, Chl-a, DMS)들의 공간분포를 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 나타냈다. 연평균 DMS flux 공간분포는 대부분 중국 화동지역(상하이 인근) 연안과 제주도 주변 연안에서 높은 값을 보이고 보하이해에서도 비교적 높게 나타났다. 반면, 우리나라 동해와 일본 부근 해역에서는 다소 낮게 나타났다. 연구기간 (2013~2015)동안 이러한 공간분포의 패턴은 서로 유사하다. 2013년에서 2015년으로 갈수록 전체적으로 DMS flux 값의 크기는 감소하는 경향을 보였으며 특히, 화동지역 연안에서 크게 감소한 것을 알 수 있다(Fig. 6).

DMS flux 산출에 이용된 주요 요소(SST, SSW, Chl-a, DMS)들의 공간분포를 살펴 보면, 모든 요소들이 DMS flux와 유사하게 화동지역 연안에서 비교적 높은 값을 보이고 있지만, 일부 해역에서는 다르게 나타났다. 우선 SST는 DMS flux 분포와 달리, 화동지역 연안보다 일본인근 해역에서 더 높게 분포하였다. SSW는 DMS flux와 가장 유사하게 화동지역 연안 및 제주도 주변 연안에서 가장 높게 나타났으며, 일부 러시아 인근 해역에서도 높게 추정되었다. Chl-a와 DMS 농도는 DMS flux와 유사하게 화동지역 연안에서 높게 추정되었으나, 보하이해에서 더 큰 분포를 나타냈다. 이러한 Chl-a 및 DMS 분포는 Yang et al. (2014) 논문에서 여름철(2013년 6월 21일~7월 11일)에 보하이해와 황해에서 Chl-a와 해수 DMS 농도를 측정된 결과, 본 연구의 공간분포와 유사하게 나타난 것을 확인 할 수 있었다. 또한 보하이해와 황해에서 해수 DMS 측정 농도는 평균 12.01 nM으로, 본 연구의 2013년 여름철(6~8월)에 같은 영역으로 비교했을 때, 평균 9.64 nM으로 유사하게 나타났다(Yang et al., 2014).

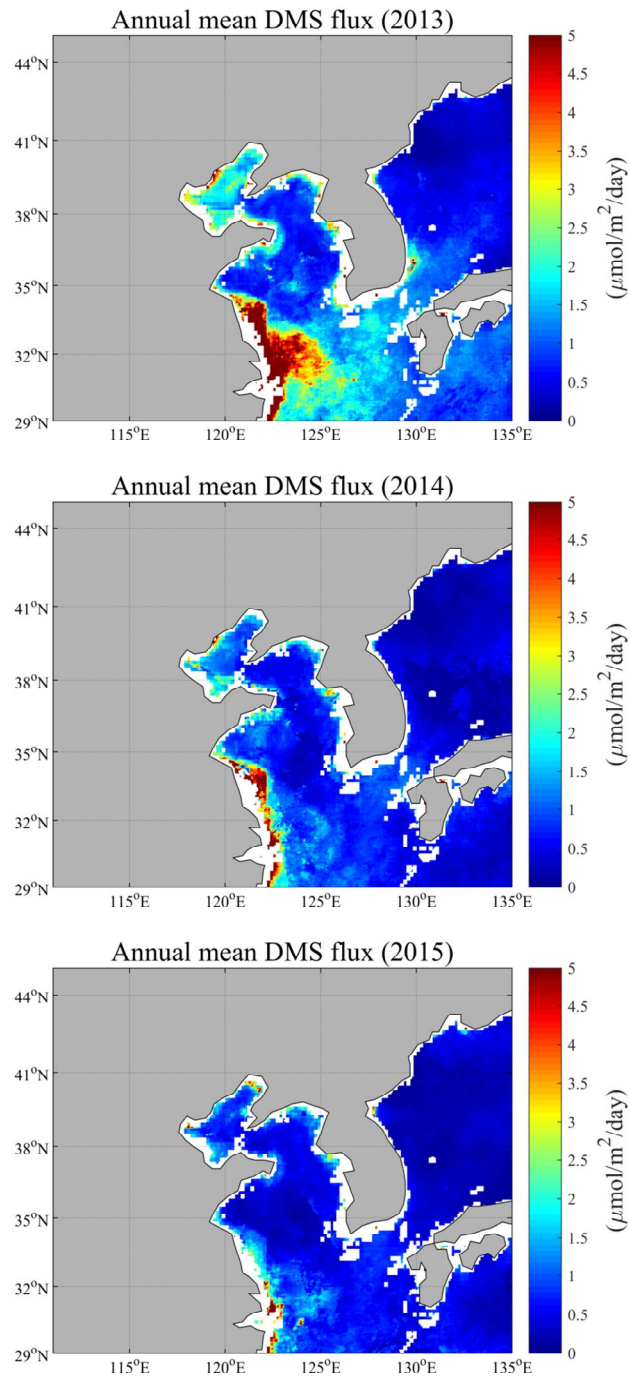


Fig. 6. Spatial distributions of annual mean DMS flux ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ) in the eastern Asian ocean during the study period (2013–2015).

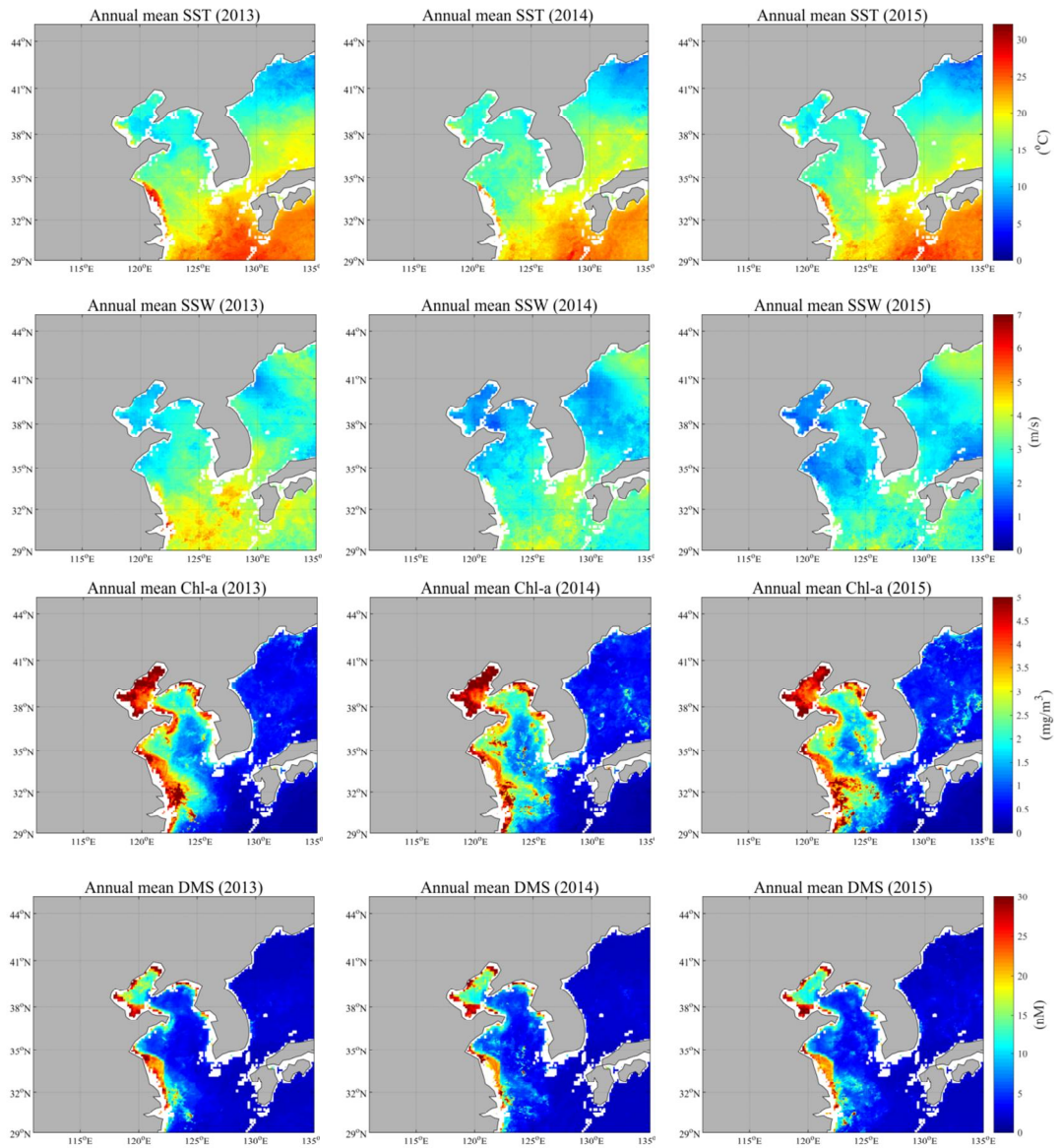


Fig. 7. Spatial distributions of annual mean SST, SSW, Chl-a, and DMS concentrations in the eastern Asian ocean during the study period (2013–2015).



Fig. 8는 연구기간(2013~2015년)동안의 위도 구간별(4° 간격) DMS flux의 연변화를, Fig. 9는 DMS flux와 관련된 주요 요소(SST, SSW, Chl-a, DMS)들의 연변화를 나타낸다. 연도별 DMS flux를 살펴보면(Fig. 8), 2013년 평균  $1.45 \pm 2.38 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 이며 2014년과 2015년은 각각 평균  $0.75 \pm 1.03 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ,  $0.57 \pm 0.68 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로 2013년에서 2015년으로 갈수록 점차 감소하는 경향이 나타났다(Fig. 8과 Table 3). DMS flux와 주요 요소(SST, SSW, Chl-a, DMS)들의 연변화를 비교해 보면(Fig. 8과 Fig. 9), SST는 2013년 평균  $17.91 \pm 4.85 \text{ }^\circ\text{C}$ , 2014년 평균  $17.21 \pm 4.29 \text{ }^\circ\text{C}$ , 2015년 평균  $17.17 \pm 4.57 \text{ }^\circ\text{C}$ 으로, SSW는 2013년 평균  $3.35 \pm 0.71 \text{ m/s}$ , 2014년 평균  $2.78 \pm 0.63 \text{ m/s}$ , 2015년 평균  $2.64 \pm 0.57 \text{ m/s}$ 으로 DMS flux의 연변화와 유사하게 감소하는 경향이 나타났다. 반면 Chl-a 농도는 2013년 평균  $1.32 \pm 1.40 \text{ mg}/\text{m}^3$ , 2014년 평균  $1.40 \pm 1.48 \text{ mg}/\text{m}^3$ , 2015년 평균  $1.49 \pm 1.41 \text{ mg}/\text{m}^3$ 으로, DMS 농도는 2013년  $4.51 \pm 5.60 \text{ nM}$ , 2014년 평균  $4.55 \pm 6.06 \text{ nM}$ , 2015년 평균  $4.69 \pm 5.51 \text{ nM}$ 으로 약간 증가하는 추세로 감소하는 DMS flux와는 다른 경향을 보였다(Fig. 9).

위도 구간별로 살펴보면, DMS flux는 대체로 위도가 낮은 구간에 높게, 위도가 높은 구간에서는 낮게 나타났다. 예를 들면, 2013년도에는  $29^\circ\text{N} \sim 33^\circ\text{N}$  위도 구간이 평균  $2.19 \pm 3.45 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로 가장 높게 나타났으며  $41^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{N}$ 는  $0.33 \pm 0.16 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로 가장 낮게 나타났다.  $29^\circ\text{N} \sim 33^\circ\text{N}$  위도는 앞서 살펴본 공간분포(Fig. 6)에서 2013년에 가장 높게 나타난 중국 화동지역(상하이 인근) 연안이 속해 있는 위도인 것을 확인하였다. 2014년도는 2013년도와 일부 다르게,  $33^\circ\text{N} \sim 37^\circ\text{N}$  위도 구간이  $0.90 \pm 1.18 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 로 가장 높았으며 그 다음은  $29^\circ\text{N} \sim 33^\circ\text{N}$  ( $0.88 \pm 1.21 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ),  $37^\circ\text{N} \sim 41^\circ\text{N}$  ( $0.56 \pm 0.60 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ),  $41^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{N}$  ( $0.26 \pm 0.15 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ) 순으로 추정되었다. 2015년은 2013년과 동일하게  $29^\circ\text{N} \sim 33^\circ\text{N}$  위도 구간이 평균  $0.76 \pm 0.92 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로 높은 값을 나타냈으며  $41^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{N}$  위도 구간에서는  $0.40 \pm 0.34 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 로 가장 낮게 나타났다. 이러한 위도 구간별 DMS flux는 관련 요소(SST, SSW, Chl-a, DMS)들 중 SST와 SSW가 DMS flux와 유사하게  $29^\circ\text{N} \sim 33^\circ\text{N}$  위도 구간에서 높은 분포를 보였으나 Chl-a와 DMS 농도는 DMS flux가 다소 낮게 추정된  $37^\circ\text{N} \sim 41^\circ\text{N}$  위도 구간에서 가장 높게

추정되었다. 한편, DMS flux에서 41°N~45°N 위도 구간에서 가장 낮게 추정되었는데 SSW는 해당 위도 구간에 비교적 높게 추정되었다. 이는 41°N~45°N 위도 구간에서 Chl-a 농도(평균 1 mg/m<sup>3</sup> 이하), DMS 농도(평균 2 nM 이하), SST (10° 이하)가 다른 지역에 비해 매우 낮게 추정되어 최종적으로 DMS flux가 낮게 추정된 것으로 판단된다.

DMS flux와 주요 요소의 연변화 및 공간분포를 정리해보면, Chl-a와 DMS 농도가 37°N~41°N 위도 구간에 월등히 높게 나타났음에도 불구하고 DMS flux는 비교적 낮게 추정된 것을 알 수 있다. 이는 같은 위도 구간에서 SSW와 SST가 비교적 낮게 추정되어 해양에서 대기로의 전달속도가 낮아져 DMS flux 역시 낮게 추정된 것으로 사료된다. 하지만, 이와 반대로 SSW와 SST가 우리나라 동해 부근과 일본인근 해역에서 높은 값을 나타냈음에도 불구하고 DMS flux는 낮게 추정되었다. 이는 Chl-a와 DMS 농도가 해당 해역에서 낮게 나타났기 때문으로 추정된다. 따라서, 해양에서 대기로의 전달 속도인 SSW와 SST로 인해 DMS flux가 증가 할 수도 있으며, 높은 SSW와 SST가 나타났음에도 불구하고 Chl-a와 DMS 농도가 너무 낮으면 결국 DMS flux가 감소할 수 있는 것으로 판단된다.

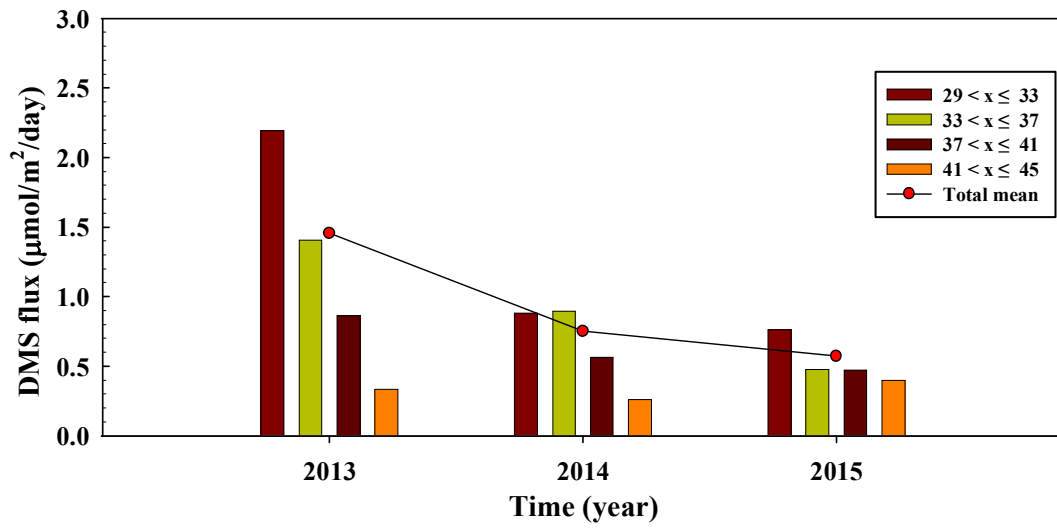


Fig. 8. Yearly variations in DMS flux for each latitude band (4° interval between 29° and 45°) during the study period (2013–2015).

Table 3. Yearly variations in DMS flux (μmol/m<sup>2</sup>/day) for each latitude band (4° interval between 29° and 45°) during the study period (2013–2015)

Year	All	29°N–33°N	33°N–37°N	37°N–41°N	41°N–45°N
2013	1.45±2.38 <sup>a</sup>	2.19±3.45	1.41±1.81	0.86±0.75	0.33±0.16
2014	0.75±1.03	0.88±1.21	0.90±1.18	0.56±0.60	0.26±0.15
2015	0.57±0.68	0.76±0.92	0.48±0.40	0.47±0.54	0.40±0.34

<sup>a</sup> Mean ± standard deviation.

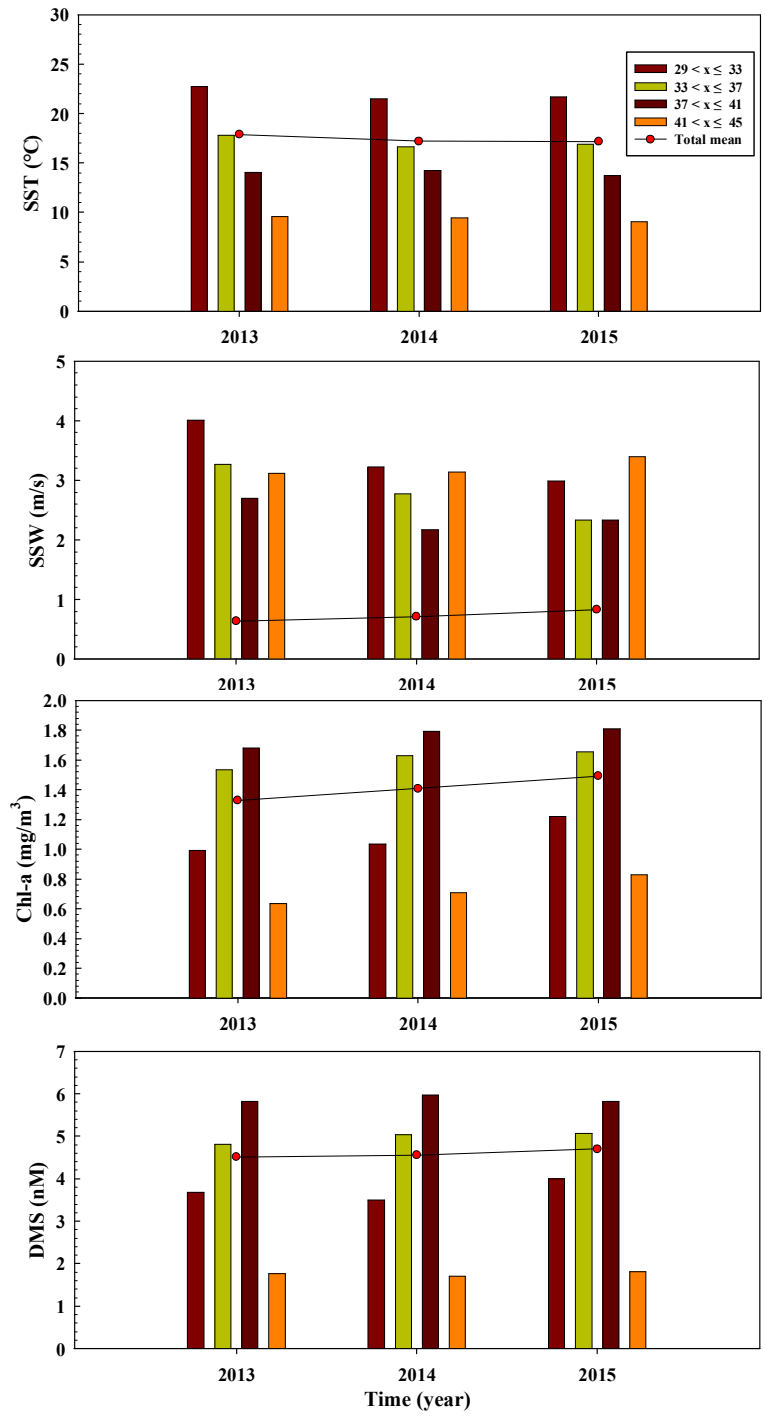


Fig. 9. Yearly variations of SST, SSW, Chl-a, and DMS concentrations for each latitude band (4° interval between 29° and 45°) during the study period (2013–2015).

### 3.2.2. 월/계절 변화

Figs. 10과 11는 동아시아 해역에서 DMS flux 및 이와 관련된 주요 요소(SST, SSW, Chl-a, DMS)들의 계절별 공간분포를 각각 나타낸다. 2015년 겨울철의 공간 분포는 2016년 1월과 2월 자료(연구기간 아님)를 제외한 2015년 12월 자료로만 사용하였다. 연구기간(2013~2015년)동안 DMS flux의 계절별 분포에서 2013년 가을철이 가장 높게 나타났으며, 특히 중국 화동지역(상하이 인근)연안에서 가장 높은 값을 나타냈고, 제주도 주변, 일본 부근 연안까지 광범위하게 높게 추정되었다. 2013년 여름철에도 2013년 가을철과 비슷한 분포로 높은 값을 나타내고 있지만 가을철에 비해 높은 값이 분포하는 범위가 작게 나타났다(Fig. 10). 2014년과 2015년의 계절 분포는 겨울철에 가장 높게 나타났고 공간분포에서는 동해를 제외한 대부분의 해역에서 골고루 높게 분포하는 모습을 보였다. 2014년과 2015년은 전체적으로 2013년에 비해 높은 DMS flux의 분포 영역이 감소하고 있으며, 2014년과 2015년의 여름 및 가을철은 2013년도에 높게 나타난 중국 화동지역(상하이 인근) 연안이 눈에 띄게 감소한 반면, 봄철은 3년 내내 가장 낮게 나타났다.

주요 요소(SST, SSW, Chl-a, DMS)들의 계절별 공간분포에서는 SSW가 대체로 겨울철에 높게 봄철에 낮은 공간분포를 보여 DMS flux와 가장 유사하게 나타난다(Fig. 11). 예를 들면, DMS flux는 2013년 가을에 화동지역 연안에서 일본인근 해역까지 높게 분포하는 모습을 보이고 2013년도에서 2015년으로 올수록 감소하는 분포가 나타났는데 SSW는 이와 같은 유사한 분포를 나타냈다. 반면, SST 분포가 낮은 위도에서 높게 나타나는 것은 DMS flux와 유사하지만, 화동지역 연안보다 외해에 위치한 일본 인근해역을 중심으로 높게 나타나며 DMS flux와 다르게 겨울철에는 낮은 분포를 보인다. Chl-a와 DMS 농도 역시 보하이해와 화동 지역 연안에서 높은 값을 분포하고 있지만 DMS flux의 계절 특성과는 일부 일치하지 않았다. 한편, DMS flux가 겨울철에 동해 및 러시아 인근해역에는 낮은 분포를 나타내는데 SSW는 러시아 인근해역에서 높게 나타났다. 이는 SSW를 제외한 모든 요소가 러시아 인근해역에서 낮게 분포하여 DMS flux 역시 러시아 인근해역에서 낮게 추정된 것으로 사료된다.

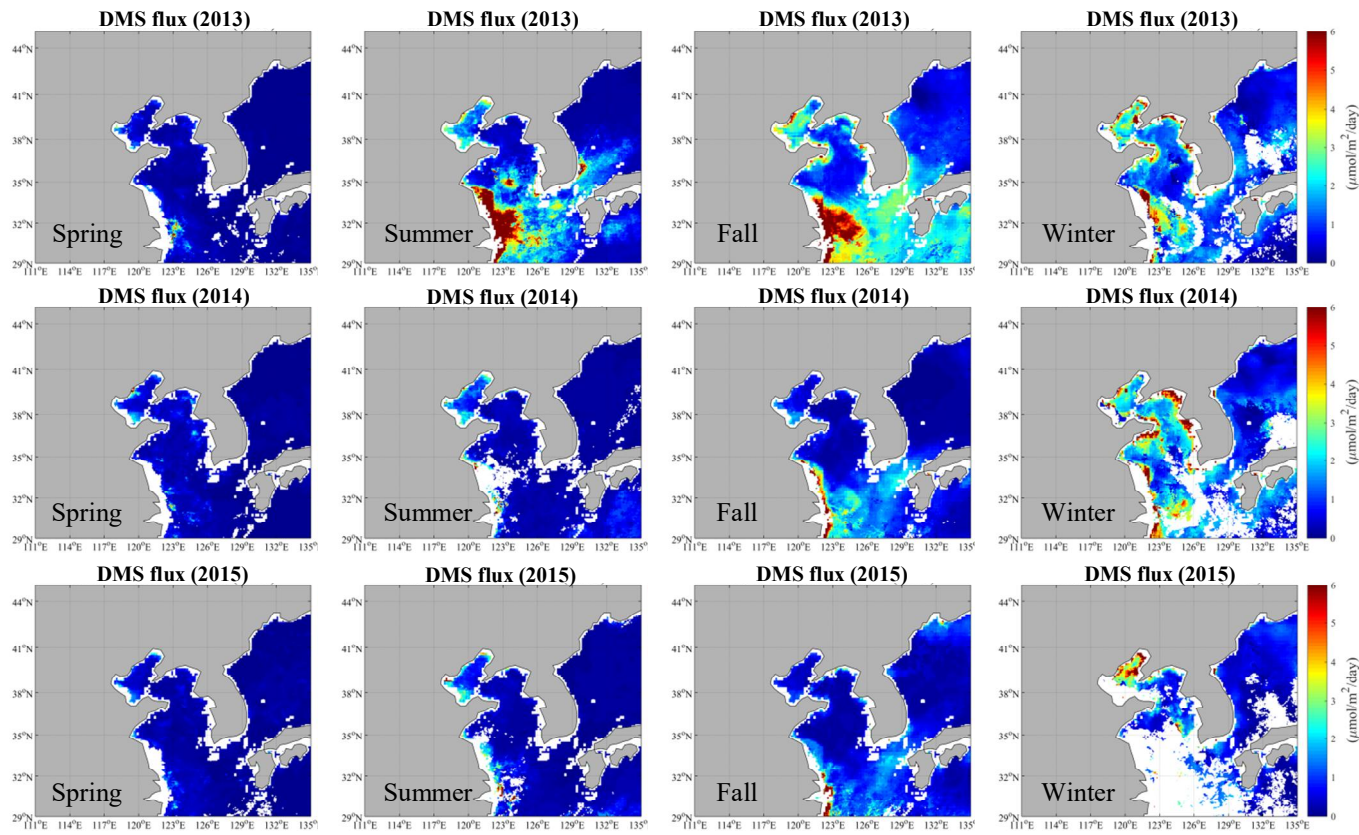


Fig. 10. Spatial distributions of DMS flux ( $\mu\text{mol/m}^2/\text{day}$ ) in the eastern Asian ocean during four seasons in 2013–2015.

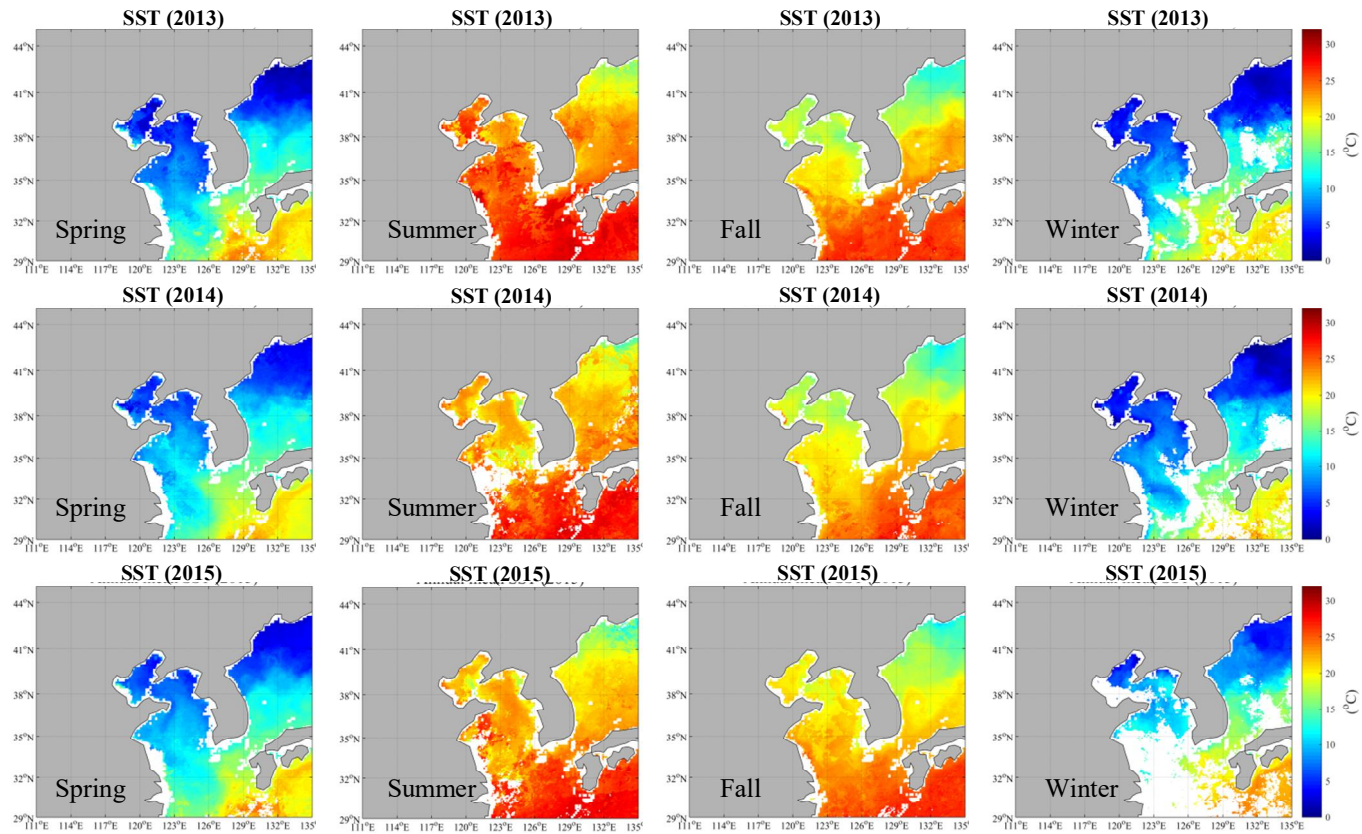


Fig. 11. Spatial distributions of SST, SSW, Chl-a, and DMS concentrations in the eastern Asian ocean during four seasons in 2013–2015.

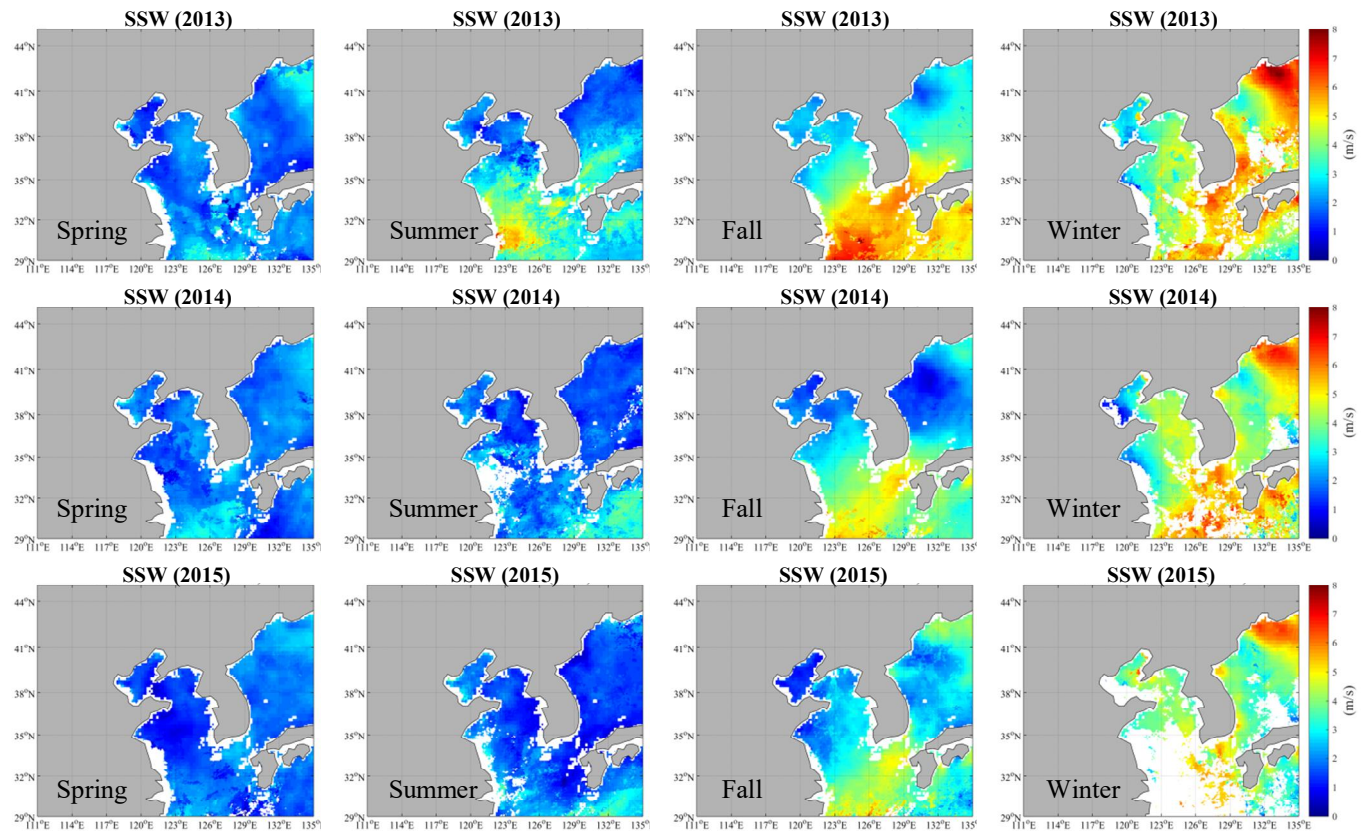


Fig. 11. (Continued.)



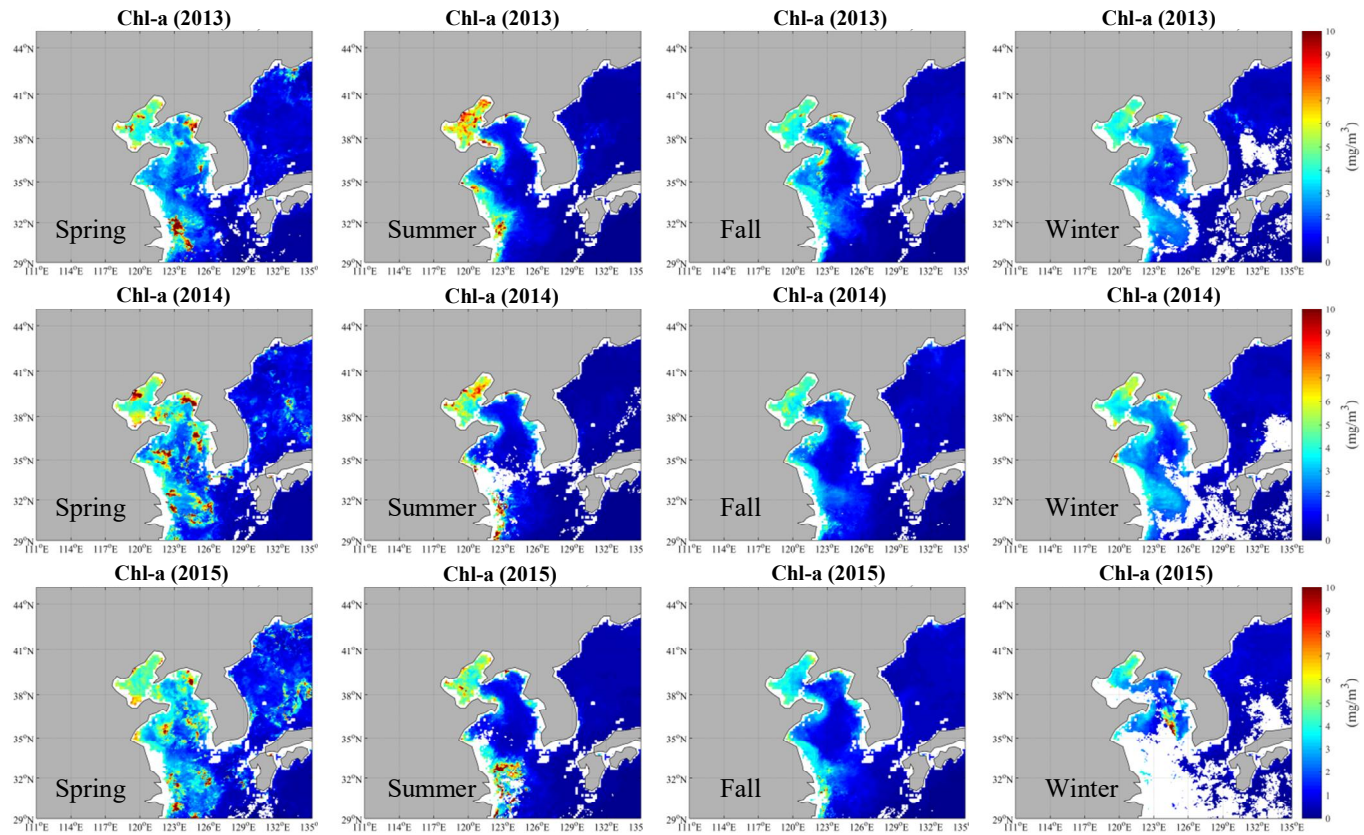


Fig. 11. (Continued.)

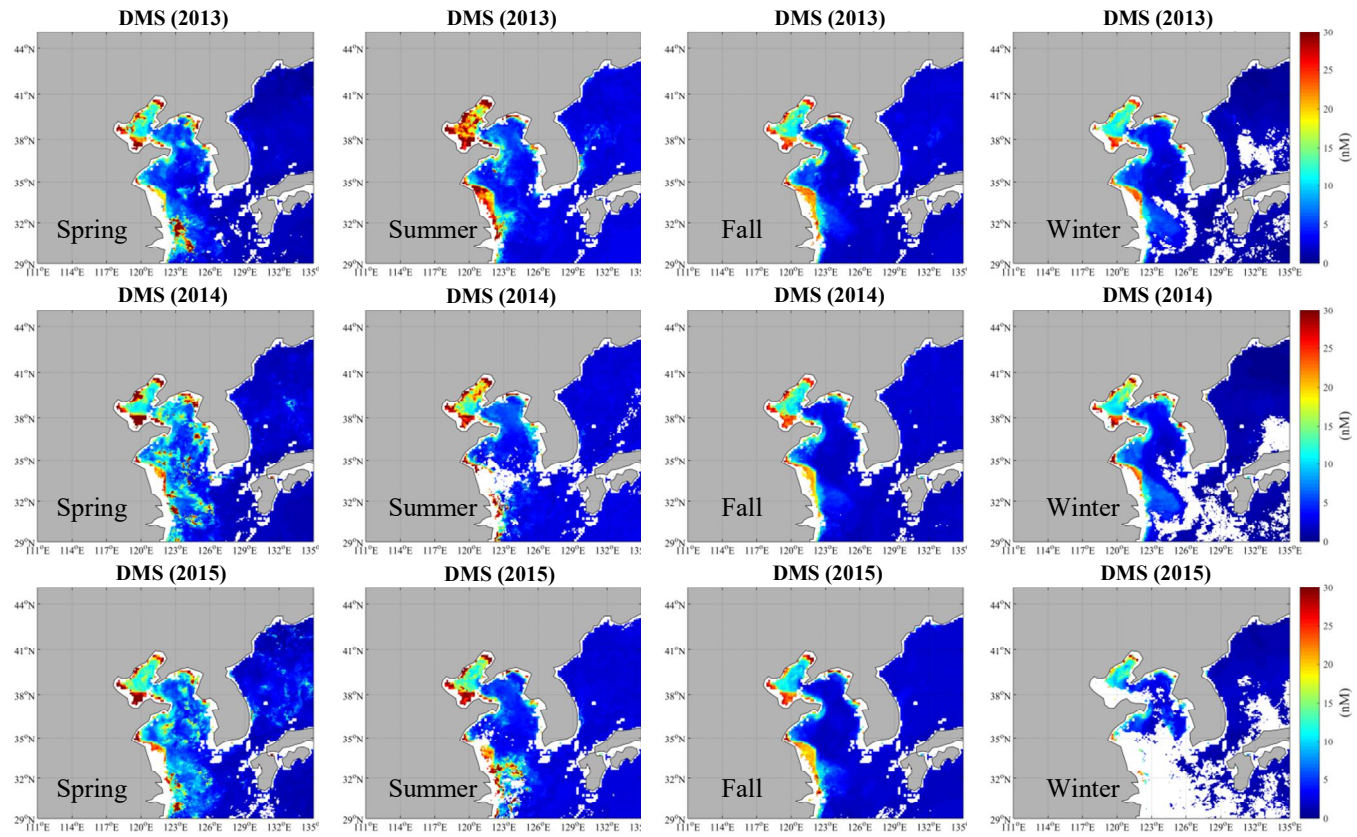


Fig. 11. (Continued.)

연구기간(2013~2015)동안 동아시아 해역에서 위도 구간별(4° 간격) DMS flux의 계절변화(Fig. 12) 및 월변화(Fig. 13)를 살펴보았다. 계절별 평균 DMS flux는 2013년에 가을>여름>겨울>봄 순으로, 2014년과 2015년은 겨울>가을>여름>봄 순으로 대체로 가을 및 겨울철이 높고 봄철이 낮게 나타났다(Fig. 12). 월별 평균 DMS flux를 보면, 2013년은 가을철인 10월에 2.57  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 로 가장 높고 2013년은 봄철인 3월에 0.13  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로 가장 낮게 추정되었다. 2014년과 2015년은 각각 겨울철인 12월에 3.37  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ , 1월에 1.38  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 로 높게 나타난 반면, 2014년과 2015년은 봄철인 3월에 각각 0.12  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ , 0.14  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로 낮게 추정되었다(Fig. 13).

위도별로 자세히 살펴보면, 계절별 평균 DMS flux는 가장 낮은 위도 구간인 29°N~33°N에서 가장 높게, 가장 높은 위도 구간인 41°N~45°N에서 가장 낮게 나타났다. 예를 들어, 29°N~33°N 위도에서는 2013년 가을철에  $3.33 \pm 3.32$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로(월별: 2013년 10월 5.55  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ) 가장 높게 그 다음 계절 평균은 2013년 여름철과 2014년 겨울철이 각각  $2.56 \pm 5.24$ ,  $1.69 \pm 1.49$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로(월별: 2013년 7월 2.96  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ , 2014년 12월 2.54  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ) 높게 나타났다. 반면, 41°N~45°N에서는 2013년 봄철에  $0.03 \pm 0.03$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로(월별: 0.01  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ) 가장 낮게 추정되었다.

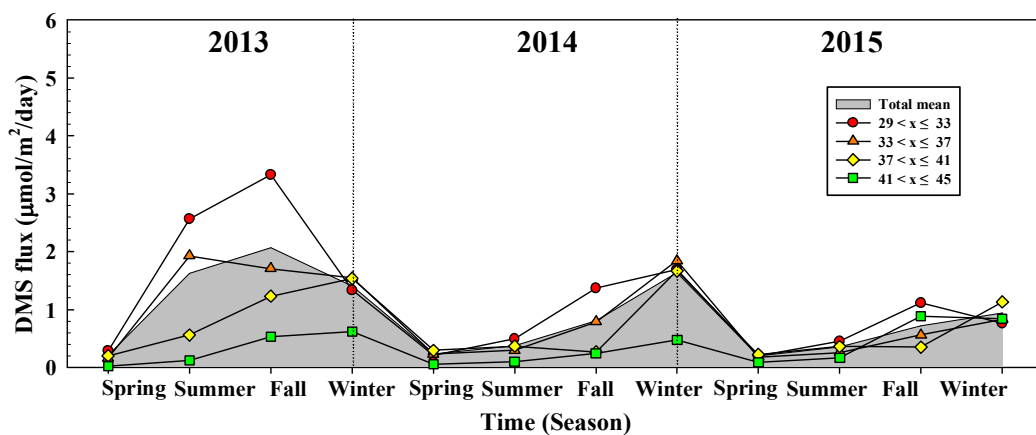


Fig. 12. Seasonal variations in DMS flux for each latitude band (4° interval between 29° and 45°) during the study period (2013–2015).

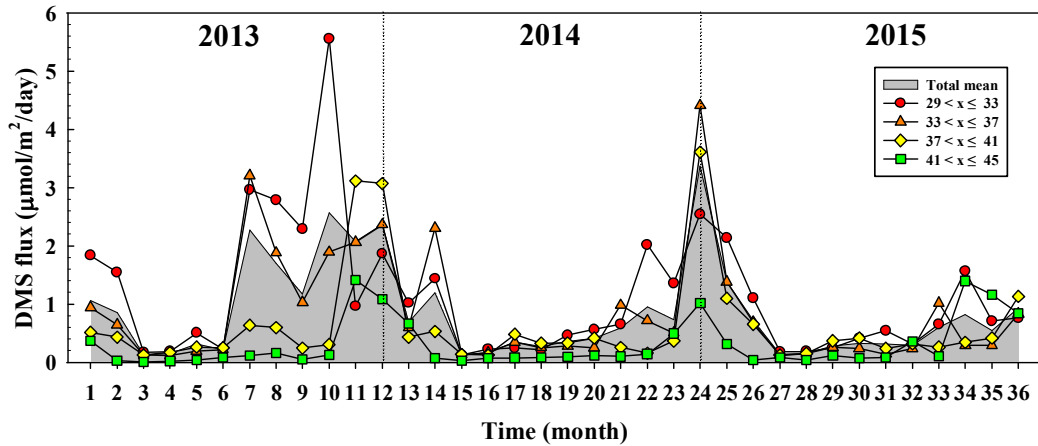


Fig. 13. Monthly variations in DMS flux for each latitude band ( $4^\circ$  interval between  $29^\circ$  and  $45^\circ$ ) during the study period (2013–2015).

동아시아 해역 DMS flux의 월/계절 변화의 주요 원인을 보다 상세히 살펴보기 위해 주요 요소(SSW, SST, Chl-a 및 DMS 농도)들의 위도 구간별( $4^\circ$  간격) 계절변화(Fig. 14) 및 월변화(Fig. 15) 특성을 분석하였다. 대체로 겨울철에 높게 나타난 DMS flux와 달리 SST는 2013~2015년 모두 여름>가을>봄>겨울 순으로 겨울이 가장 낮게 나타났다. 또한 DMS flux의 계절변화에서 가장 낮게 나타난 봄철에 Chl-a와 DMS 농도는 높게 나타나 DMS flux와 다른 계절 경향을 보였다(Chl-a: 2013~2014년 봄>겨울>가을>여름, 2015년 봄>가을>여름>겨울 순 DMS: 2013년 여름>봄>가을>겨울, 2014~2015년 봄>여름>가을>겨울). 반면, SSW는 2013년과 2014년에 겨울>가을>여름>봄 순으로 나타났고 2015년은 겨울>가을>봄>여름 순으로 대부분 겨울이 높고 여름과 봄에 가장 낮은 값으로 추정되어 DMS flux와 유사하게 나타났다. 예를 들면, 2013년 봄철 DMS flux와 SSW는 서로 낮게 추정된 반면, 같은 연도 및 같은 계절에 SST, Chl-a, DMS 농도는 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 2014년 겨울철 DMS flux가 높게 추정된 반면 SST, Chl-a, DMS 농도는 낮게 나타났으며 SSW만 비교적 높게 추정된 것을 알 수 있었다.

위도 구간별로 살펴보면, DMS flux는 대부분  $29^\circ\text{N} \sim 33^\circ\text{N}$  위도 구간에서 높고

상대적으로 41°N~45°N 위도 구간에서 낮게 추정되었다. 이러한 위도별 변화는 대체로 SSW(41°N~45°N 위도 구간 제외)와 SST에서 유사하게 나타났다. 반면 Chl-a 및 DMS 농도는 DMS flux에서 낮게 추정되었던 37°N~41°N 위도 구간에서 가장 높게 추정되었다. 전반적으로, 동아시아 해역에서 DMS flux에 영향을 주는 주요 인자는 SSW가 가장 크게 기여한 것으로 사료되며, 이는 Chl-a와 DMS 농도 등 다른 요소의 영향도 복합적으로 작용되는 것으로 판단된다.

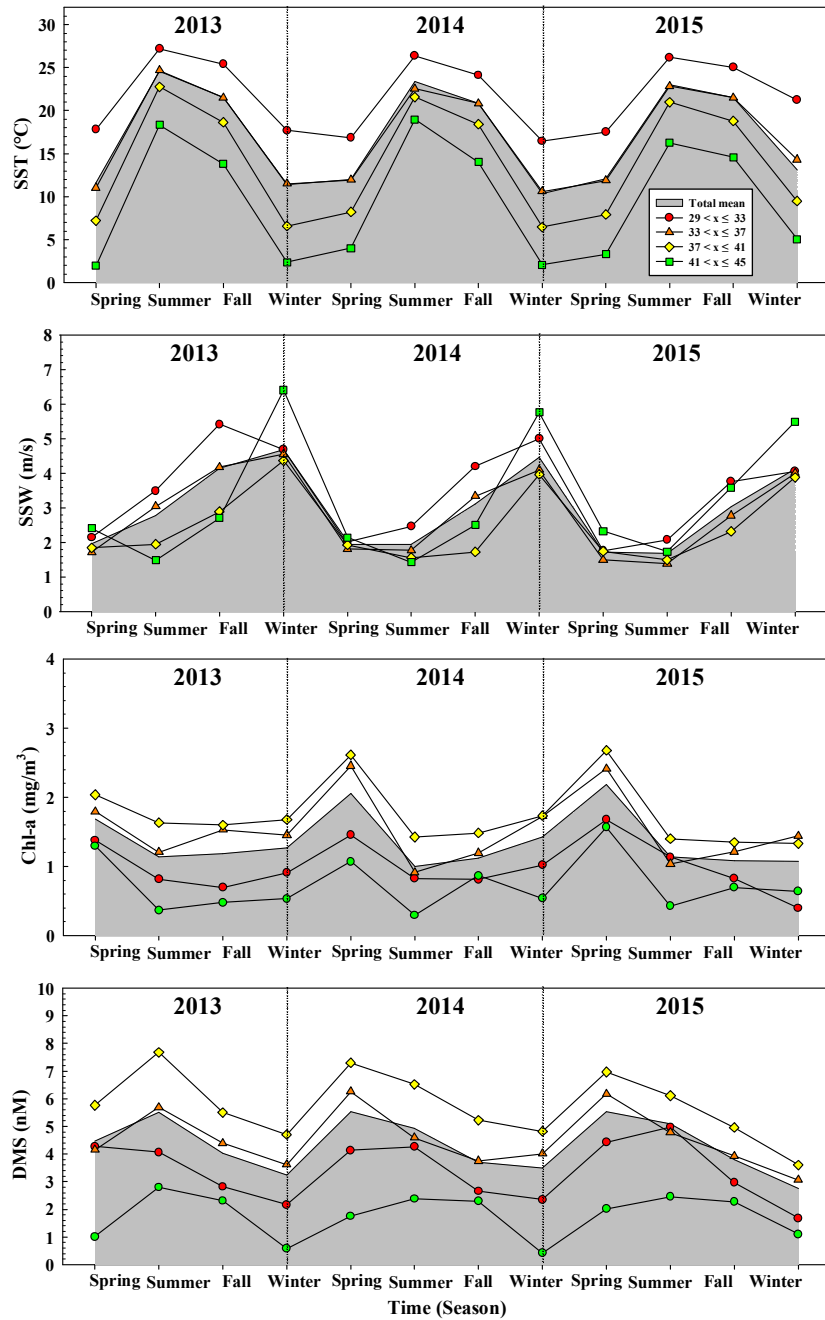


Fig. 14. Seasonal variations in SST, SSW, Chl-a, and DMS concentrations for each latitude band ( $4^\circ$  interval between  $29^\circ$  and  $45^\circ$ ) during the study period (2013–2015).

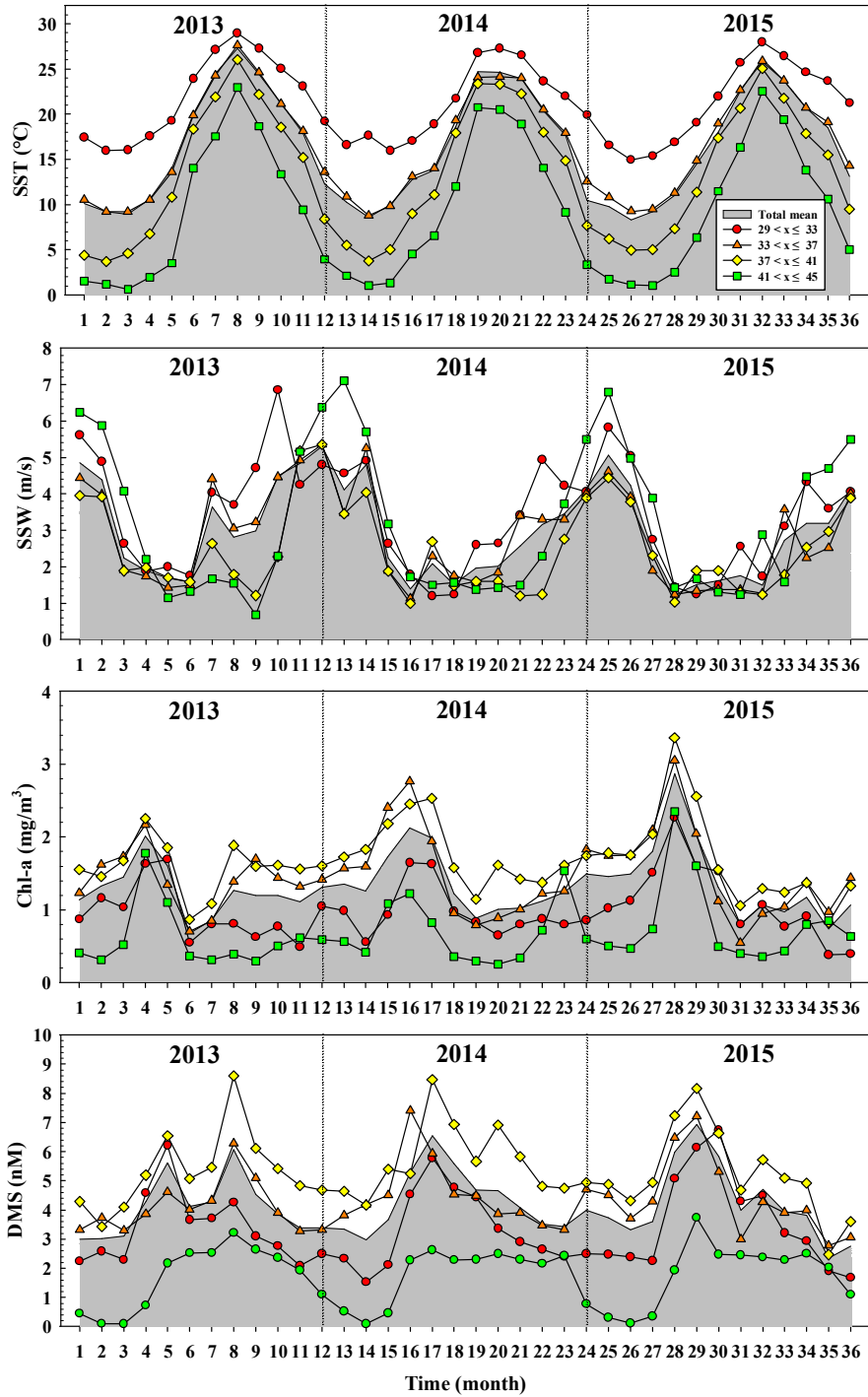


Fig. 15. Monthly variations in SST, SSW, Chl-a, and DMS concentrations for each latitude band (4° interval between 29° and 45°) during the study period (2013–2015).

### 3.3. 해양기원 에어로졸에 따른 직접적 복사강제력 추정

#### 3.3.1. 에어로졸 광학특성(AOD) 분석

본 연구의 3.2절에서 동아시아 해역에서의 해양-대기 DMS flux를 산출하였다. 이를 통해 대기 중 DMS 관련된 에어로졸(DMS-related aerosol) 즉, 황산염(sulfate) 농도/수농도를 산출하여 에어로졸 광학 모델(OPAC)을 수행하였다. Table 4는 OPAC 모델링을 통해 추정된 에어로졸(예, 황산염)의 광학특성(흡수계수( $\sigma_{\text{ex}}$ ), 산란계수( $\sigma_{\text{sc}}$ ), 소산계수( $\sigma_{\text{ab}}$ ), AOD ( $\tau_{550}$ ) 등) 주요 광학변수의 월별 특성을 나타낸다(water-soluble 가정, 파장 550nm, 상대습도 80%). 연구기간 (2013~2015)동안 흡수계수( $\sigma_{\text{ab}}$ )는 평균  $0.22 \pm 0.48 \text{ Mm}^{-1}$ (범위:  $0.03 \sim 1.03 \text{ Mm}^{-1}$ )와 산란계수( $\sigma_{\text{sc}}$ )는 평균  $14.15 \pm 30.70 \text{ Mm}^{-1}$ (범위:  $1.66 \sim 64.76 \text{ Mm}^{-1}$ )으로 흡수계수보다 산란계수가 높게 추정되었다. 흡수계수와 산란계수의 합인 소산계수는 평균  $14.37 \pm 31.19 \text{ Mm}^{-1}$ (범위:  $1.69 \sim 65.82 \text{ Mm}^{-1}$ )이고, AOD는 평균  $0.04 \pm 0.05$  ( $0.02 \sim 0.13$ )로 추정되었다. DMS flux에 의한 황산염 에어로졸의 광학 특성(흡수계수, 산란계수, 소산계수, AOD)은 2014년 12월에 각각  $1.03 \pm 1.15 \text{ Mm}^{-1}$ ,  $64.79 \pm 72.17 \text{ Mm}^{-1}$ ,  $65.82 \pm 73.32 \text{ Mm}^{-1}$ ,  $0.13 \pm 0.13$ 으로 가장 높게 나타났으며 2013년 3월에 각각  $0.03 \pm 0.04 \text{ Mm}^{-1}$ ,  $1.66 \pm 2.77 \text{ Mm}^{-1}$ ,  $1.69 \pm 2.82 \text{ Mm}^{-1}$ ,  $0.02 \pm 0.00$ 으로 가장 낮게 산정되었다. 계절별 특성에서는 DMS flux에 의한 황산염 에어로졸의 모든 광학특성이 겨울>가을>여름>봄 순으로 추정되었다(그림 제외). 이러한 에어로졸의 계절별 광학 특성은 DMS flux으로 인한 영향인 것으로 판단된다.

Fig. 16은 연구기간(2013~2015년)동안 OPAC 모델을 통해 추정된 광학 변수 중 AOD의 연평균 공간분포를 나타낸다. 전반적으로, AOD 분포는 대부분 화동지역 연안과 보하이해 등에서 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 반면, 동해와 일본 인근 해역에서는 낮게 추정되었다. 이러한 AOD의 분포는 연평균 DMS flux 공간분포와 유사하게 추정되었으며(Fig. 6 참조), 위도 구간별( $4^\circ$



간격) AOD의 연변화에서도 DMS flux와 유사하게 나타나는 것을 확인하였다 (그림 제외). 예를 들면, 연구기간(2013~2015년)동안 연평균 AOD는 2013년  $0.047\pm 0.054$ , 2014년  $0.047\pm 0.042$ , 2015년  $0.046\pm 0.031$ 로 2013년에서 2015년으로 갈수록 미세하게 감소하였다. 위도 구간별로는 2013년과 2015년에  $29^{\circ}\text{N}\sim 33^{\circ}\text{N}> 33^{\circ}\text{N}\sim 37^{\circ}\text{N}> 37^{\circ}\text{N}\sim 41^{\circ}\text{N}> 41^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$  순으로, 2014년은  $33^{\circ}\text{N}\sim 37^{\circ}\text{N}> 29^{\circ}\text{N}\sim 33^{\circ}\text{N}> 37^{\circ}\text{N}\sim 41^{\circ}\text{N}> 41^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$  순으로 나타나 낮은 위도 구간에서 대체로 높게, 높은 위도구간에서 낮게 추정되어 위도구간별 DMS flux의 연변화와 유사하였다.

Table 4. Optical properties (RH=80%) of DMS-related aerosol (e.g. sulfate) in the eastern Asian ocean at a wavelength of 550 nm simulated by OPAC model

Year	Month	$\sigma_{ab}$	$\sigma_{sc}$	$\sigma_{ex}$	AOD( $\tau_{550\text{nm}}$ )
2013	1	$0.20\pm 0.29$	$12.54\pm 18.34$	$12.74\pm 18.63$	$0.04\pm 0.03$
	2	$0.15\pm 0.22$	$9.17\pm 13.67$	$9.32\pm 13.88$	$0.03\pm 0.02$
	3	$0.03\pm 0.04$	$1.66\pm 2.77$	$1.69\pm 2.82$	$0.02\pm 0.00$
	4	$0.03\pm 0.05$	$1.69\pm 2.94$	$1.71\pm 2.99$	$0.02\pm 0.01$
	5	$0.06\pm 0.15$	$3.56\pm 9.71$	$3.61\pm 9.87$	$0.02\pm 0.02$
	6	$0.05\pm 0.09$	$2.86\pm 5.86$	$2.90\pm 5.96$	$0.02\pm 0.01$
	7	$0.37\pm 0.57$	$23.45\pm 35.59$	$23.82\pm 36.17$	$0.06\pm 0.06$
	8	$0.31\pm 0.85$	$19.67\pm 53.55$	$19.98\pm 54.42$	$0.05\pm 0.10$
	9	$0.22\pm 0.38$	$13.56\pm 23.70$	$13.78\pm 24.08$	$0.04\pm 0.04$
	10	$0.47\pm 0.82$	$29.21\pm 51.16$	$29.67\pm 51.98$	$0.07\pm 0.09$
	11	$0.36\pm 0.36$	$22.84\pm 22.60$	$23.20\pm 22.97$	$0.06\pm 0.04$
	12	$0.41\pm 0.50$	$25.73\pm 31.34$	$26.14\pm 31.84$	$0.06\pm 0.06$
2014	1	$0.21\pm 0.24$	$13.36\pm 15.23$	$13.57\pm 15.47$	$0.04\pm 0.03$
	2	$0.40\pm 0.80$	$25.27\pm 50.20$	$25.67\pm 51.03$	$0.06\pm 0.09$
	3	$0.04\pm 0.05$	$2.55\pm 3.36$	$2.59\pm 3.41$	$0.02\pm 0.01$
	4	$0.06\pm 0.10$	$3.49\pm 6.20$	$3.54\pm 6.30$	$0.02\pm 0.01$
	5	$0.11\pm 0.24$	$7.19\pm 14.82$	$7.30\pm 15.06$	$0.03\pm 0.03$
	6	$0.08\pm 0.13$	$5.01\pm 8.09$	$5.09\pm 8.22$	$0.03\pm 0.01$
	7	$0.12\pm 0.29$	$7.61\pm 18.28$	$7.73\pm 18.57$	$0.03\pm 0.03$
	8	$0.13\pm 0.25$	$8.01\pm 15.71$	$8.13\pm 15.96$	$0.03\pm 0.03$
	9	$0.19\pm 0.36$	$12.17\pm 22.85$	$12.36\pm 23.21$	$0.04\pm 0.04$
	10	$0.30\pm 0.49$	$18.84\pm 31.04$	$19.14\pm 31.53$	$0.05\pm 0.06$
	11	$0.24\pm 0.52$	$15.25\pm 32.41$	$15.49\pm 32.93$	$0.05\pm 0.06$
	12	$1.03\pm 1.15$	$64.79\pm 72.17$	$65.82\pm 73.32$	$0.13\pm 0.13$
2015	1	$0.57\pm 0.66$	$35.59\pm 41.63$	$36.15\pm 42.28$	$0.08\pm 0.07$
	2	$0.31\pm 0.54$	$19.70\pm 33.88$	$20.01\pm 34.42$	$0.05\pm 0.06$
	3	$0.06\pm 0.14$	$3.93\pm 8.81$	$4.00\pm 8.95$	$0.03\pm 0.02$
	4	$0.06\pm 0.10$	$3.81\pm 6.08$	$3.87\pm 6.18$	$0.02\pm 0.01$
	5	$0.11\pm 0.18$	$7.15\pm 11.40$	$7.26\pm 11.58$	$0.03\pm 0.02$
	6	$0.15\pm 0.27$	$9.32\pm 16.92$	$9.47\pm 17.18$	$0.03\pm 0.03$
	7	$0.14\pm 0.39$	$8.76\pm 24.32$	$8.90\pm 24.70$	$0.03\pm 0.04$
	8	$0.13\pm 0.40$	$8.47\pm 25.40$	$8.60\pm 25.79$	$0.03\pm 0.05$
	9	$0.24\pm 0.38$	$15.33\pm 23.83$	$15.58\pm 24.21$	$0.05\pm 0.04$
	10	$0.34\pm 0.66$	$21.18\pm 41.61$	$21.52\pm 42.26$	$0.06\pm 0.07$
	11	$0.24\pm 0.35$	$14.97\pm 22.23$	$15.21\pm 22.59$	$0.04\pm 0.04$
	12	$0.41\pm 0.68$	$25.53\pm 42.84$	$25.94\pm 43.52$	$0.06\pm 0.08$

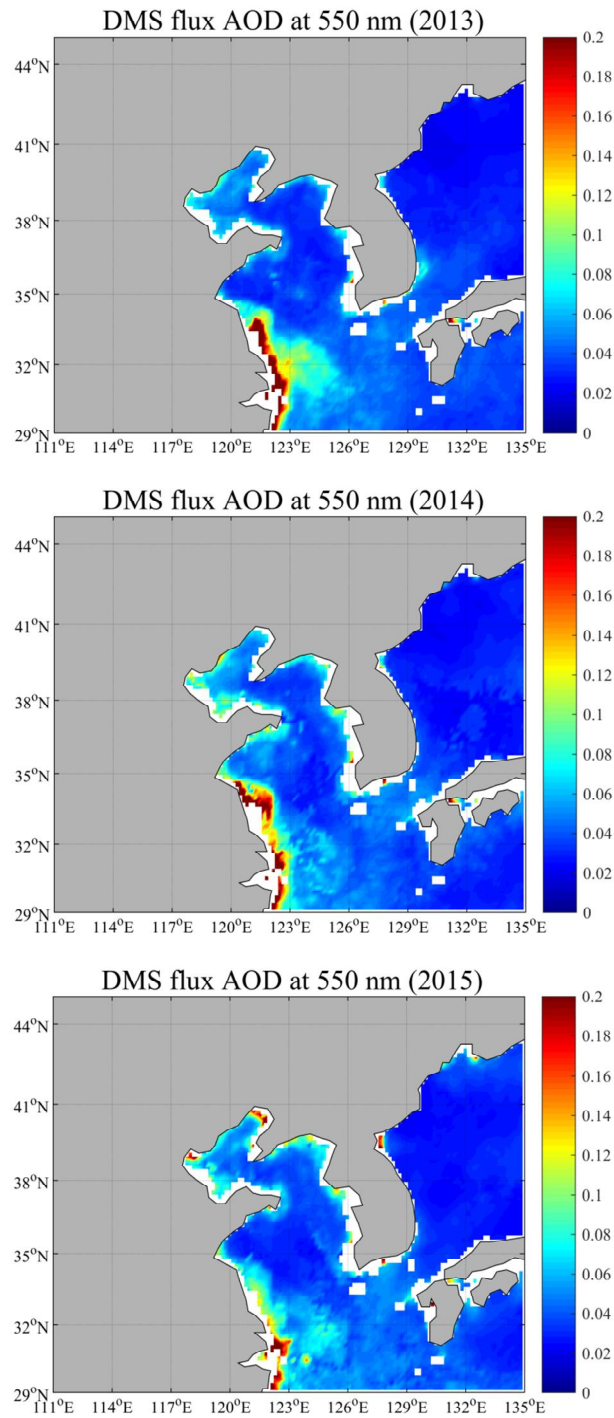


Fig. 16. Spatial distributions of annual mean AOD ( $\tau_{550}$ ) derived from DMS flux in the eastern Asian ocean during 2013–2015.

Fig. 17은 DMS 관련 에어로졸(DMS-related aerosol)로부터 즉, 황산염으로부터 산출된 AOD의 계절별 공간분포를 나타낸다. 계절별 평균 AOD (DMS)는 2013년에 가을>겨울>여름>봄 순으로, 2014년과 2015년은 모두 겨울>가을>여름>봄 순으로 나타났으며, 이는 DMS flux와 유사하게 대체로 가을과 겨울이 높고 봄철이 낮은 공간 분포였다. 연도별로 살펴보면, 2013년 봄철을 제외한 모든 계절에서 중국 화동지역(상하이 인근) 연안, 보하이해, 제주도 인근 연안 등에서 높게 나타났으며, 특히 겨울철 AOD (DMS)분포에서 우리나라 서해 연안과 산둥반도 연안, 화동지역 연안 등 여러 해역에서 가장 높게 골고루 분포하고 있다(일부 동해 제외). 반면, 봄철에는 포항보다 높은 위도에 위치한 동해에서는 대부분 낮게 추정되었다. 이러한 계절별 AOD (DMS) 분포는 2014년과 2015년에도 유사하게 나타났지만 점차 감소하는 추세로 나타났다. 특히, 여름철 화동지역 연안이 2013년에서 2015년으로 갈수록 크게 감소하였다.

연구기간(2013~2015년)동안 AOD (DMS)의 월변화를 보면(Fig. 18), 2013년 10월에 평균  $0.07 \pm 0.09$ , 2014년 12월 평균  $0.13 \pm 0.1$ , 2015년 1월 평균  $0.08 \pm 0.07$ 으로 가장 높게 나타났다. 반면 2013년과 2014년 3월에 각각  $0.02 \pm 0.01$ ,  $0.02 \pm 0.01$ , 2015년 4월에  $0.03 \pm 0.01$ 으로 가장 낮게 추정되었다. 위도 구간별( $4^\circ$  간격)로 살펴보면, DMS flux의 영향으로 대부분  $29^\circ\text{N} \sim 33^\circ\text{N}$ 에서 가장 높게 나타나고  $41^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{N}$  위도 구간이 가장 낮게 나타났다. 예를 들면,  $29^\circ\text{N} \sim 33^\circ\text{N}$  위도 구간에서 2013년 10월에  $0.13 \pm 0.13$ 으로 가장 높게 추정되었고, 다음으로는 2015년 1월에  $0.11 \pm 0.07$ , 2014년 12월에  $0.10 \pm 0.12$ 으로 나타났다. 반면,  $41^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{N}$  위도 구간에서 2013년 3월에  $0.02 \pm 0.001$ 으로 가장 낮게 추정되었다.

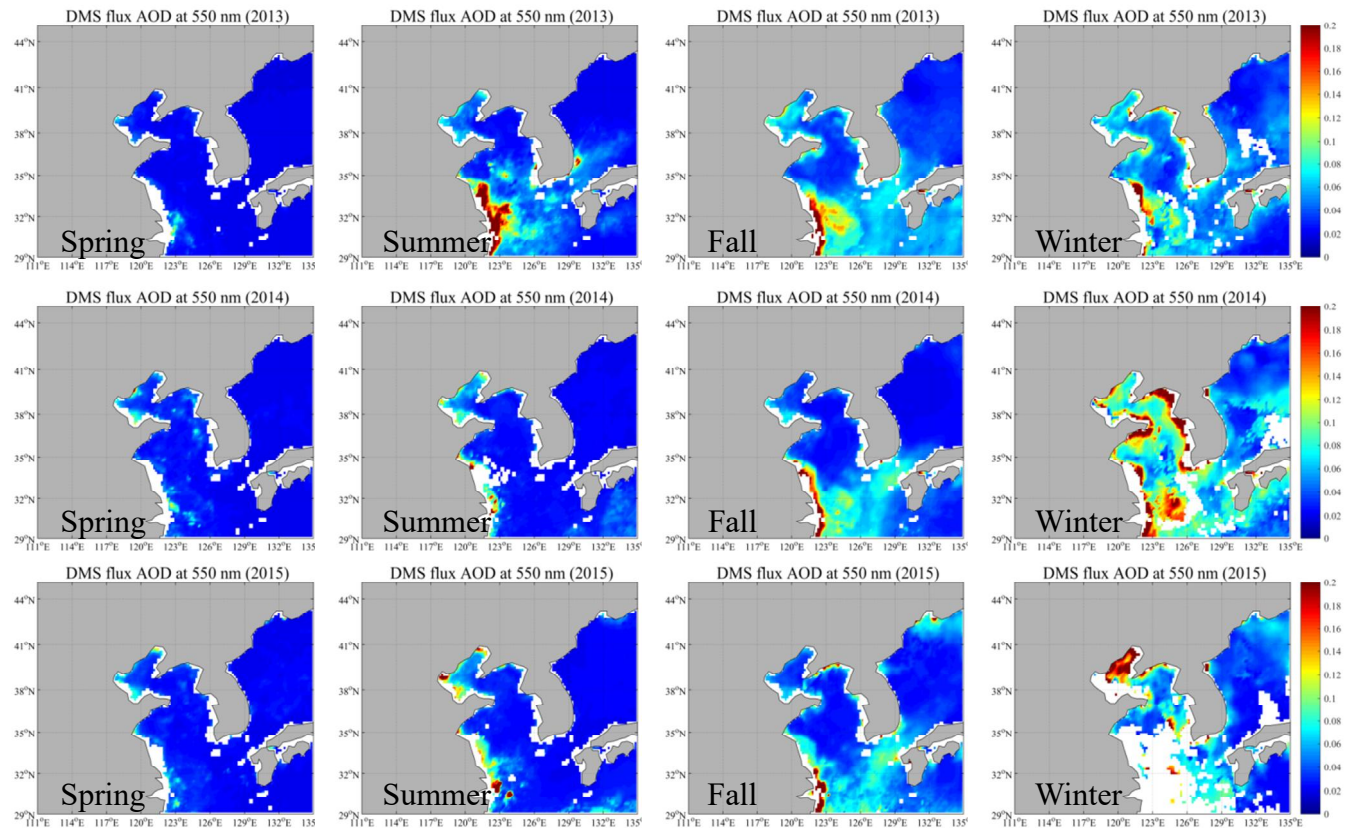


Fig. 17. Spatial distributions of seasonal average AOD ( $\tau_{550}$ ) derived from DMS flux during 2013–2015.

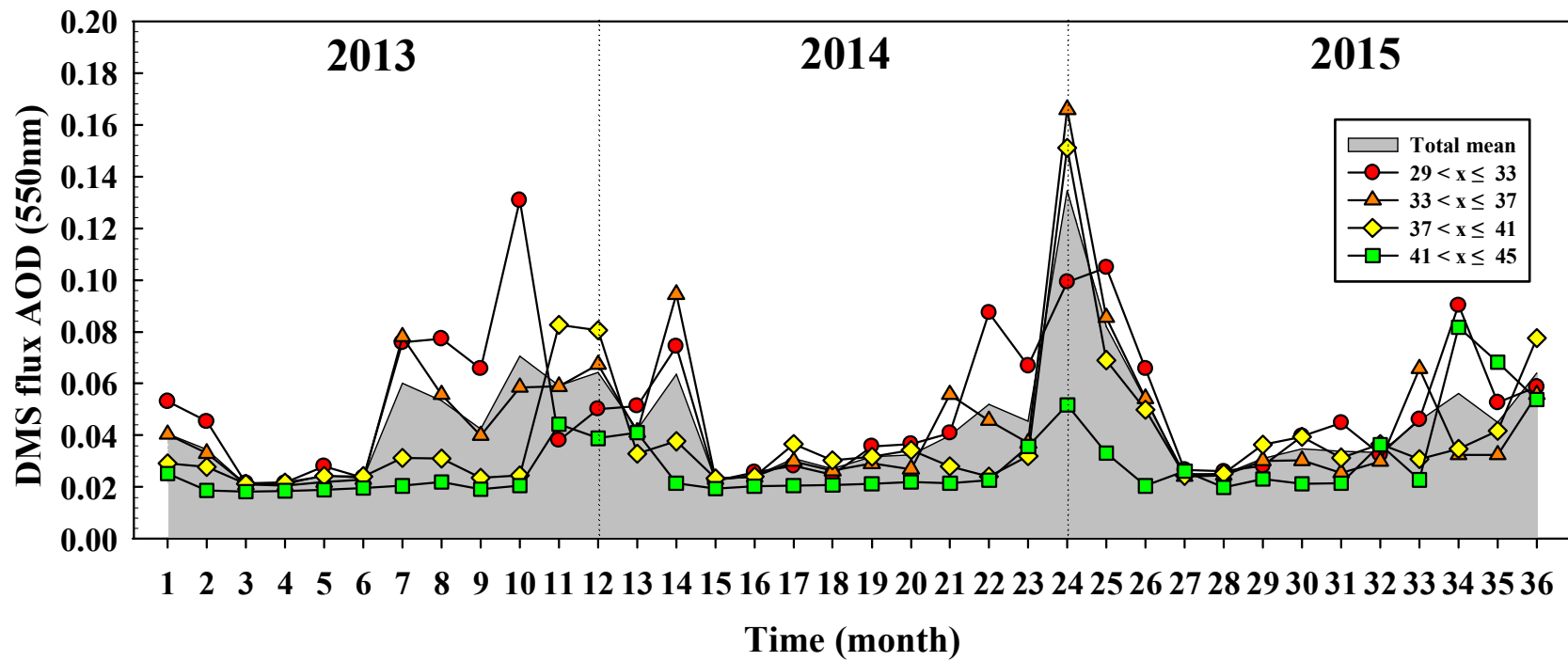


Fig. 18. Monthly variations of AOD ( $\tau_{550}$ ) derived from DMS flux (AOD (DMS)) for each latitude band ( $4^\circ$  interval between  $29^\circ$  and  $45^\circ$ ) during the study period (2013–2015).

자연적 에어로졸에 속하는 DMS 관련 황산염이 대기 전체 AOD에 미치는 기여율을 분석하기 위해, OPAC 모델 수행을 통해 계산된 DMS flux의 AOD (AOD (DMS))와 Aqua 위성 MODIS AOD (인위적 및 자연적 에어로졸)과 비교하였다. Fig. 19는 MODIS AOD에 대한 AOD (DMS) 기여율의 월변화를 나타낸다. 먼저 MODIS AOD는 평균 0.305(범위: 0.187~0.508)으로 계절별로는 대부분 봄>겨울>여름>가을 순으로 나타났다. MODIS AOD가 봄철에 높게 나타난 원인은 중국 지역의 황사 영향으로, 겨울철은 난방열 이용으로 인한 영향이 큰 것으로 판단된다. MODIS AOD를 연도별로 살펴보면, 2013년 3월에 0.459로 가장 높게 나타났고 2014년 2월과 2015년 3월에 각각 0.508, 0.372로 높게 나타났다. 반면, AOD (DMS)는 평균 0.045(범위: 0.021~ 0.135)으로 계절별로는 겨울>가을>여름>봄 순으로 추정되어 MODIS AOD와 다른 계절별 특성을 보였다. 이러한 차이는 모든 에어로졸이 혼합되어 있는 MODIS AOD와 다르게 자연적 해양기원 황산염 에어로졸만 고려되었기 때문으로 판단된다. 연도별 AOD (DMS)는 2013년 10월에 0.071, 2014년 12월과 2015년 1월에 각각 0.135, 0.082로 높게 나타났다.

MODIS AOD에 대한 AOD (DMS)의 기여율은 연구기간(2013~2015년)동안 평균 16.2%(범위: 4.6~45.9%)이며 계절별 기여도는 겨울(24.1%)>가을(22.8%)>여름(12.5%)>봄(2.4%) 순으로 나타났다. 기여율을 연도별로 살펴보면, 2013년과 2014년 12월에 각각 25.2%, 45.9%으로, 2015년 1월에 29.8%으로 가장 높게 나타났다. 반면, 2013년~2015년 3월은 각각 4.6%, 5.7%, 6.8%으로 가장 낮게 나타나 겨울철이 기여도가 가장 높고 봄철이 가장 낮게 추정되었다. AOD (DMS)에 의한 기여율은 전체 평균 16.2 %으로 낮게 추정된 것으로 판단할 수 있지만, 이것은 자연적 에어로졸 중 DMS 관련 황산염 에어로졸만을 고려한 것이기 때문이다. 이외에도 1차 에어로졸인 화산폭발에 의한 먼지나 SSA(sea spray aerosol) 등을 포함하면 자연적 에어로졸의 기여율이 지금보다 더 높아질 것으로 판단된다.

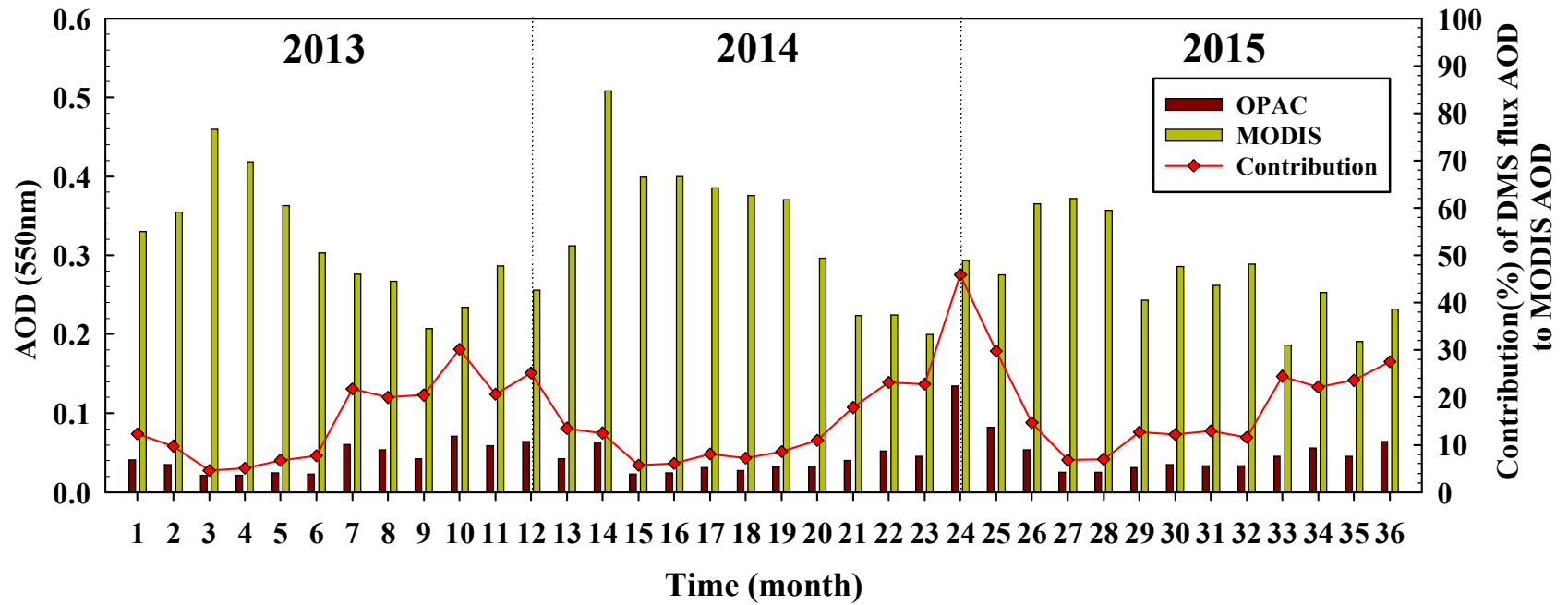


Fig. 19. Monthly variations of AOD derived from DMS flux AOD (DMS) simulated by OPAC, and MODIS AOD. The line represents the contribution (%) of AOD (DMS) to MODIS AOD.

### 3.3.2. 에어로졸 직접적 복사강제력(DRF) 추정

본 연구에서는 동아시아 해역에서 연구기간(2013~2015년)동안 DMS 관련 황산염 에어로졸의 직접적 복사강제력을 추정하기 위하여, OPAC 모델의 광학 특성(광학 변수) 값을 SBDART 모델의 입력 자료로 사용하여 모델을 수행하였다. 이를 통해 지표(SFC), 대기상단(TOA), 대기 중(ATM)에서의 직접적 복사강제력을 추정하여 연평균 공간분포를 분석하였다(Fig. 20). 직접적 복사강제력(SFC, TOA, ATM)은 대체로 중국 화동지역 연안에서 음의 복사강제력이 높게 나타났지만, 동해와 일본인근 해역에서 다소 낮게 추정되었다. 또한 2013년에 비해 2015년은 중국 화동지역(상하이 인근) 연안에서 음의 복사강제력이 약간 감소하고 있지만, 반대로 보하이해는 음의 복사강제력이 다소 증가하는 것으로 나타났다. 직접적 복사강제력 공간분포를 검증하기 위해, 선행연구(정지현 등, 2013) 공간분포와 비교해보았다. 이들은 2001~2010년동안 Terra 위성 CERES(Clouds and Earth's Radiant Energy System) 자료를 이용하여 동아시아 해역의 평균 TOA 공간분포를 나타냈다. 동아시아 지역 전체 평균  $-32.63 \text{ W/m}^2$ 으로 나타났으며 위도 낮은 해역에서 음의 복사강제력이 강하게 추정되었다. 특히, 화동지역 연안 및 제주도 인근 해역에서  $-55 \sim -88 \text{ W/m}^2$  범위의 강한 음의 직접적 복사강제력 나타나 본 연구보다 음의 복사강제력이 더 높게 추정된 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 본 연구와 다르게 인위적인 에어로졸과 자연적 에어로졸이 혼합되어 있는 인공위성 자료를 사용하였기 때문으로 사료된다. 그러나 위도가 높은 해역에 비해 낮은 해역에서 음의 복사강제력이 높게 추정된 것으로 보아(정지현 등, 2013) 본 연구의 직접적 복사강제력의 공간분포와 서로 유사하게 나타난 것을 알 수 있다.

Fig. 21은 연구기간(2013~2015년)동안 동아시아 해역에서 위도 구간별( $4^\circ$  간격) SFC, TOA, ATM에서의 직접적 복사강제력 연변화를 나타낸다(Fig. 21). 연평균 직접적 복사강제력은 SFC에서 2013년  $-18.57 \pm 16.82$ , 2014년  $-18.26 \pm 16.91$ , 2015년  $-18.57 \pm 15.68 \text{ W/m}^2$ 로, TOA는 2013년  $-16.20 \pm 14.10$ , 2014년  $-15.95 \pm 14.35$ , 2015년  $-16.23 \pm 13.25 \text{ W/m}^2$ 으로 강한 음의 복사강제력이



추정되었으며, SFC에서의 복사강제력이 TOA에서의 복사강제력보다 음의 복사강제력이 강하게 나타났다. 또한 ATM에서는 2013년  $2.37 \pm 2.84$ , 2014년  $2.31 \pm 2.62$ , 2015년  $2.35 \pm 2.53$   $W/m^2$ 으로 나타났다. 일반적으로 황산염 에어로졸은 태양 복사 에너지를 강하게 반사시키면서 지표면에 도달하는 단파복사의 양을 줄이며 지표면 냉각을 유발하기 때문에 이와 같이 음의 복사강제력이 추정된 것으로 판단된다(Tu et al., 2005; Ramanathan et al., 2005).

위도별로 자세히 살펴보면(Fig. 21), 연구기간(2013~2015년)동안 직접적 복사강제력(SFC, TOA, ATM)은 가장 낮은 위도구간에서 가장 높게 반대로 가장 높은 위도구간에서 가장 낮게 나타났다. 예를 들면,  $29^{\circ}N \sim 33^{\circ}N$  위도 구간에서 SFC, TOA, ATM에서의 직접적 복사강제력은 2013년에 각각  $-25.10 \pm 19.95$  (SFC),  $-21.65 \pm 15.97$  (TOA),  $3.46 \pm 2.05$  (ATM)  $W/m^2$ 이며, 2014년에는  $-21.38 \pm 14.20$  (SFC),  $-18.58 \pm 11.60$  (TOA),  $2.80 \pm 2.67$  (ATM)  $W/m^2$ , 2015년은  $-22.94 \pm 11.85$  (SFC),  $-19.95 \pm 9.83$  (TOA),  $2.99 \pm 2.05$  (ATM)  $W/m^2$ 으로 모두 이 위도 구간에 가장 높게 나타났다. 반면,  $41^{\circ}N \sim 45^{\circ}N$  위도 구간에서 2013년에 각각  $-10.68 \pm 1.49$  (SFC),  $-9.42 \pm 1.31$  (TOA),  $1.27 \pm 0.18$  (ATM)  $W/m^2$ , 2014년은  $-11.64 \pm 1.78$  (SFC),  $-10.26 \pm 1.56$  (TOA),  $1.88 \pm 0.98$  (ATM)  $W/m^2$ 으로, 2015년은  $-15.40 \pm 6.31$  (SFC),  $-13.52 \pm 5.34$  (TOA),  $1.88 \pm 0.98$  (ATM)  $W/m^2$ 으로 3년 내내 이 위도 구간이 가장 낮게 나타났다.

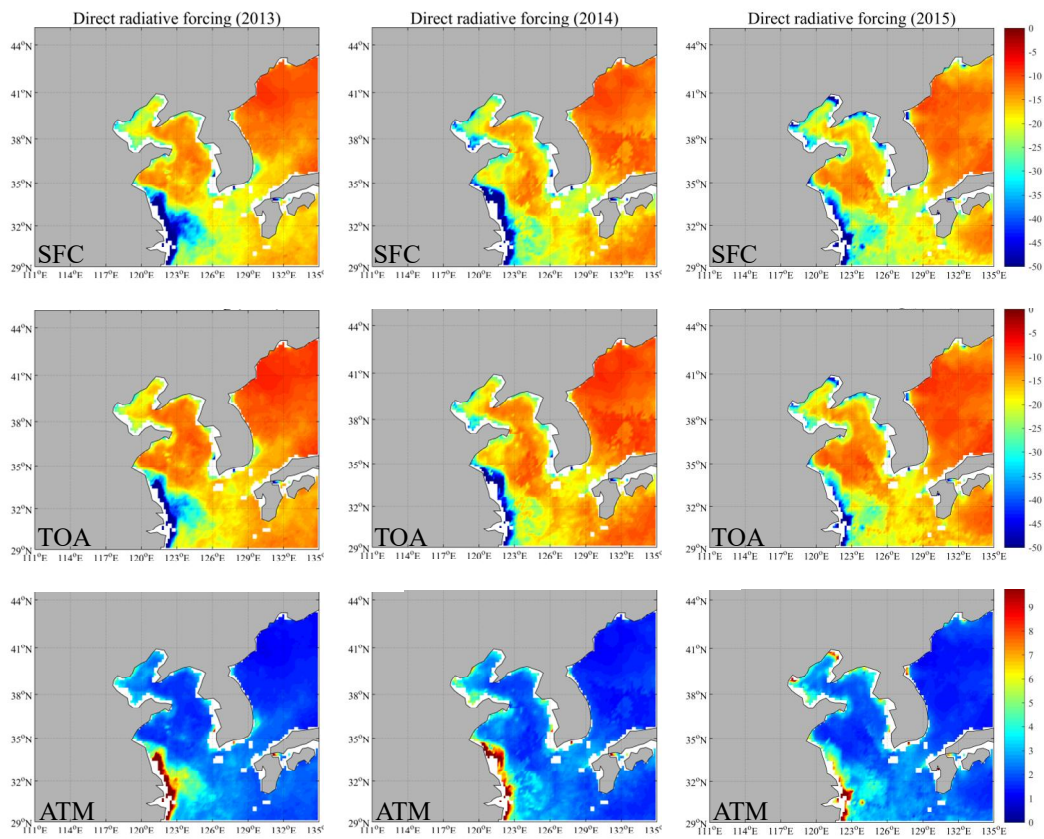


Fig. 20. Spatial distributions of the direct radiative forcing (DRF) due to annual mean DMS-related aerosol (e.g. sulfate) at SFC, TOA, and ATM during the study period (2013–2015).

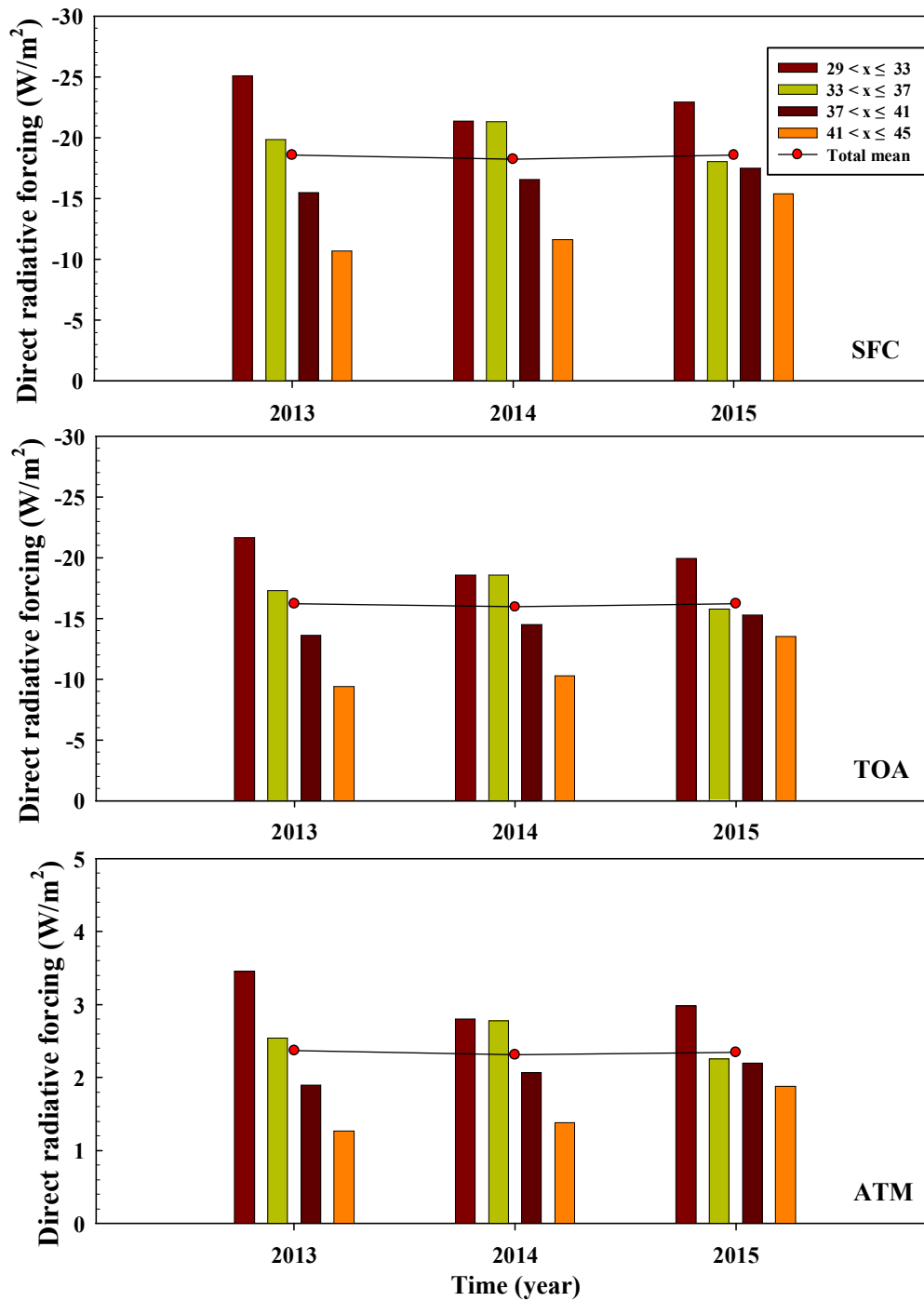


Fig. 21. Yearly variations of DRFs due to DMS-related aerosol (e.g. sulfate) at SFC, TOA and ATM for each latitude band ( $4^\circ$  interval between  $29^\circ$  and  $45^\circ$ ) during the study period (2013–2015).

Fig. 22~24은 동아시아 해역에서의 연구기간(2013~2015년)동안의 계절 평균 직접적 복사강제력(SFC, TOA, ATM)의 공간분포를 나타낸다. 직접적 복사강제력(SFC, TOA, ATM)은 2013년에 가을>겨울>여름>봄 순으로, 2014년과 2015년에 겨울>가을>여름>봄 순으로 대부분 가을과 겨울이 높고 봄이 가장 낮게 나타났다. 공간적 분포를 자세히 살펴보면(Fig. 22), 대부분 겨울철에 러시아 인근해역과 일본 인근해역을 제외한 모든 해역에서 높은 음의 복사강제력이 나타났고 특히, 화동지역 연안과 보하이해, 우리나라 서해 연안 주변에 매우 높게 나타났다. 가을과 여름철에는 다른 지역보다 화동지역 연안에 높은 음의 복사강제력이 나타났으며 일부 제주도 인근 연안, 일본 부근 해역까지 넓게 나타나는 분포를 보였다. 반면, 봄철에는 음의 복사강제력 분포가 가장 낮게 나타났다.

동아시아 해역에서 SFC, TOA, ATM에서의 직접적 복사강제력 월변화를 상세히 살펴보기 위해 위도 구간별(4° 간격) 월변화를 분석하였다(Fig. 25). 전반적으로, 겨울철인 2014년 12월에 각각  $-46.06 \pm 31.40$  (SFC),  $-39.96 \pm 26.24$  (TOA),  $6.10 \pm 5.26$  (ATM) (2014년 겨울 평균:  $-32.87 \pm 12.79$  (SFC),  $-28.66 \pm 10.90$  (TOA),  $4.21 \pm 1.94$  (ATM)  $W/m^2$ )으로 가장 높게 나타났으며 봄철인 2013년 3월에 각각  $-9.87 \pm 2.19$  (SFC),  $-8.68 \pm 1.92$  (TOA),  $1.19 \pm 0.28$  (ATM)  $W/m^2$  (2013년 봄 평균:  $-10.47 \pm 3.38$  (SFC),  $-9.17 \pm 2.91$  (TOA),  $1.29 \pm 0.48$  (ATM)  $W/m^2$ )으로 가장 낮게 나타났다. 위도별로 보면 SFC, TOA, ATM에서의 복사강제력은 대부분  $29^\circ N \sim 33^\circ N$ 에서 가장 높게 나타나고  $41^\circ N \sim 45^\circ N$  위도 구간이 가장 낮게 나타났다.  $29^\circ N \sim 33^\circ N$  위도에서는 2013년 10월에 각각  $-51.33 \pm 31.52$  (SFC),  $-44.10 \pm 22.14$  (TOA),  $7.21 \pm 6.62$  (ATM)으로 가장 높게 나타났다. 다음은 2015년 1월과 2014년 10월에 각각  $-42.15 \pm 19.08$  (SFC),  $-36.75 \pm 15.94$  (TOA),  $5.47 \pm 3.56$  (ATM)으로,  $-36.88 \pm 21.42$  (SFC),  $-32.00 \pm 17.60$  (TOA),  $4.88 \pm 3.97$  (ATM)  $W/m^2$ 으로 높게 나타났다. 반면  $41^\circ N \sim 45^\circ N$  위도 구간에서 2013년 2월에 각각  $-8.35 \pm 0.36$  (SFC),  $-7.68 \pm 0.32$  (TOA),  $2.39 \pm 7.68$  (ATM)으로 가장 낮게 나타났다. 이것은 DMS flux 및 AOD (DMS)의 위도 구간별 패턴과 서로 유사하였다.

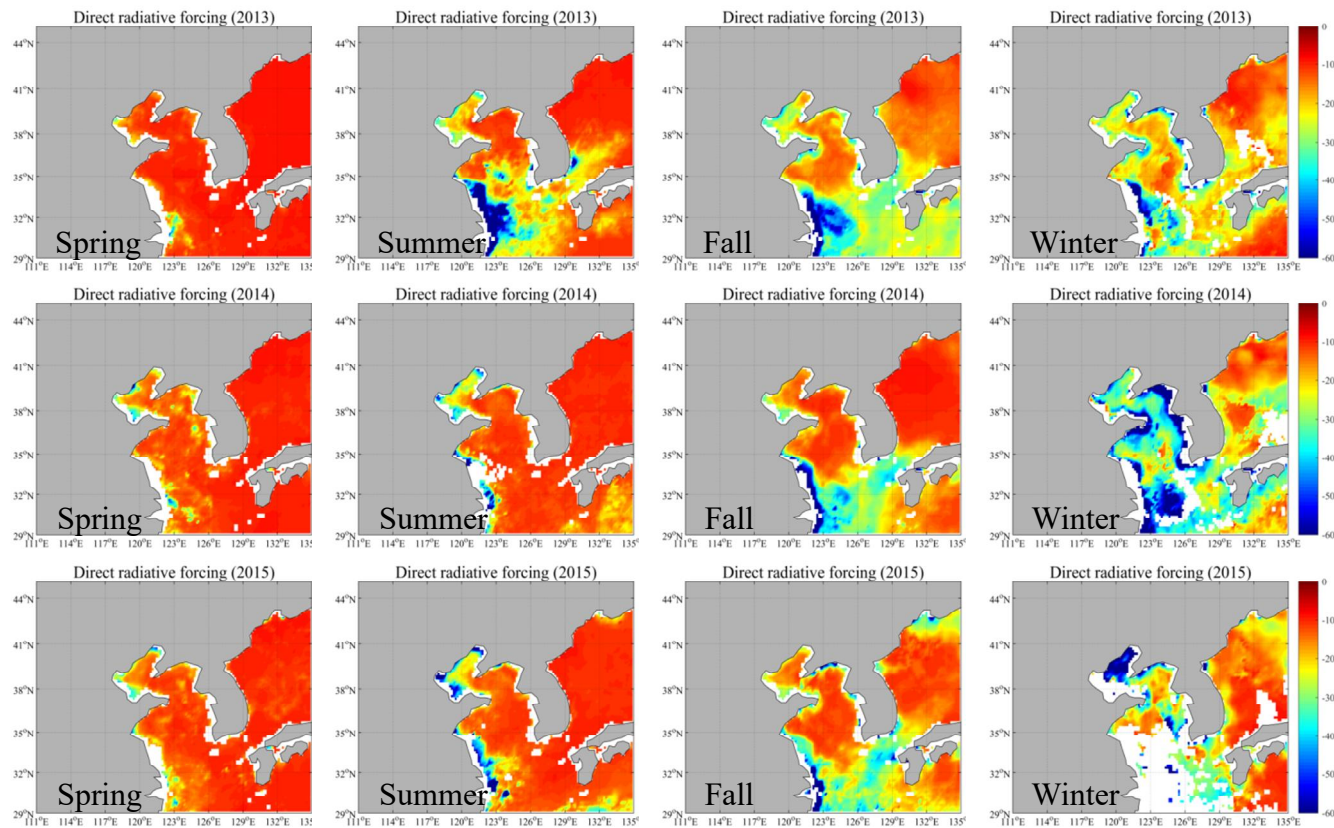


Fig. 22. Spatial distributions of DRFs due to seasonal average DMS-related aerosol(e.g. sulfate) at SFC during 2013–2015.

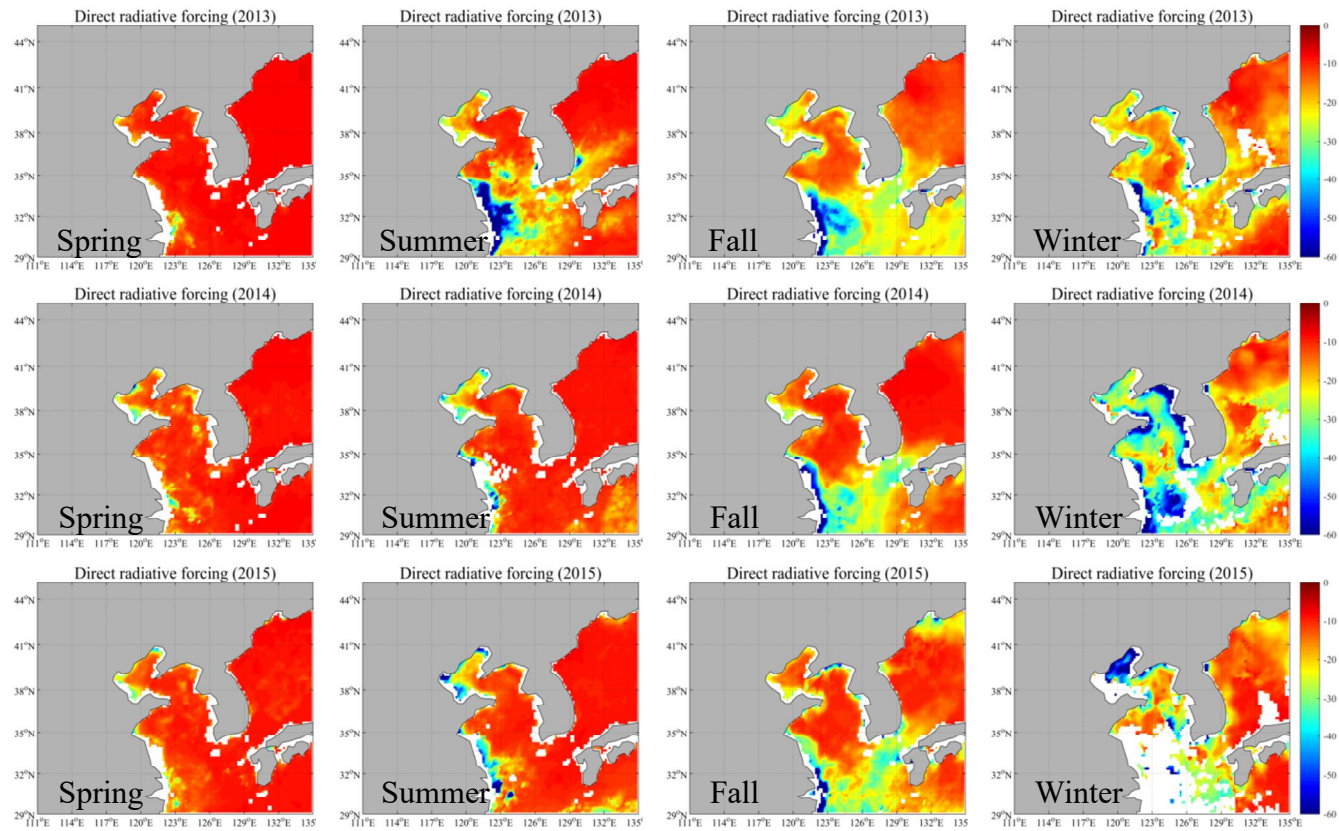


Fig. 23. Same as Fig. 22 except for the DRF at TOA.

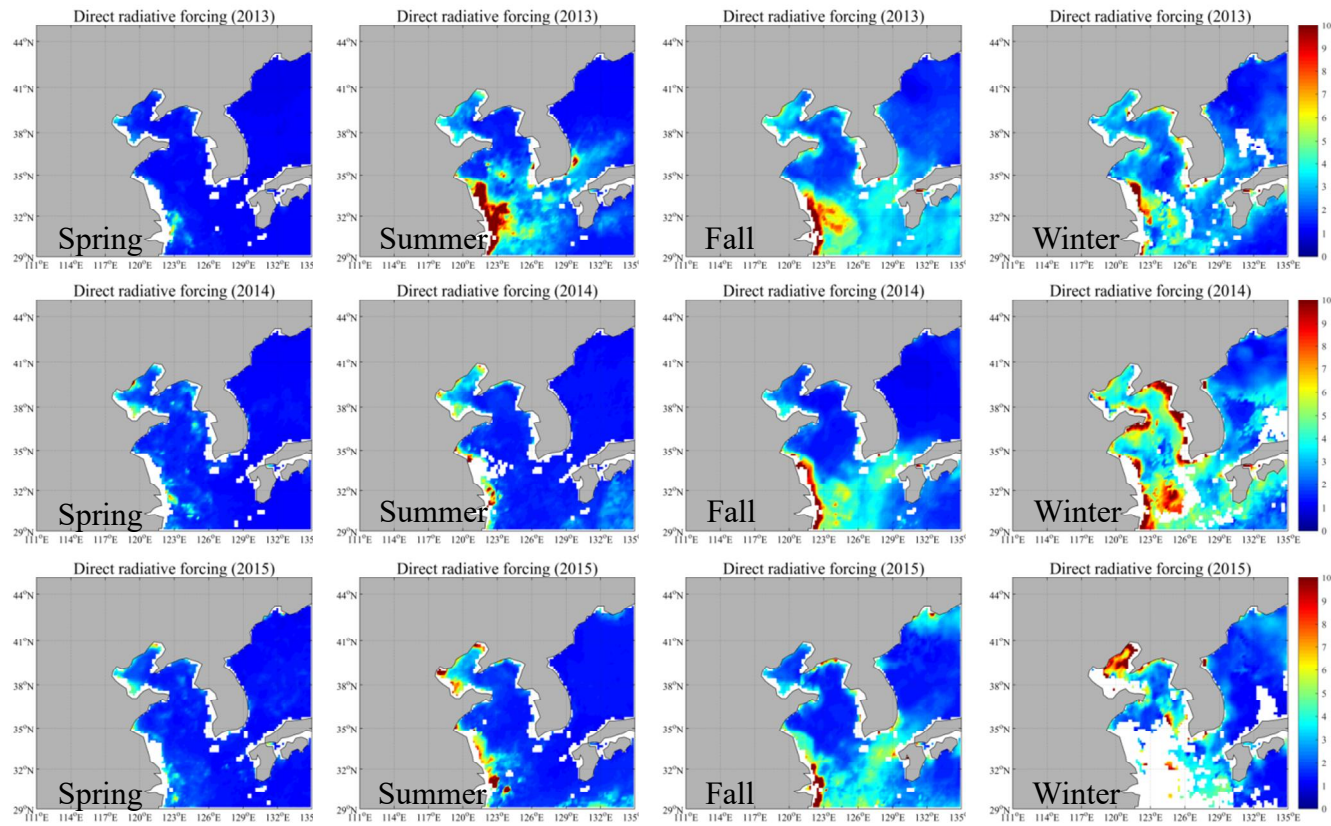


Fig. 24. Same as Fig. 22 except for the DRF at ATM.

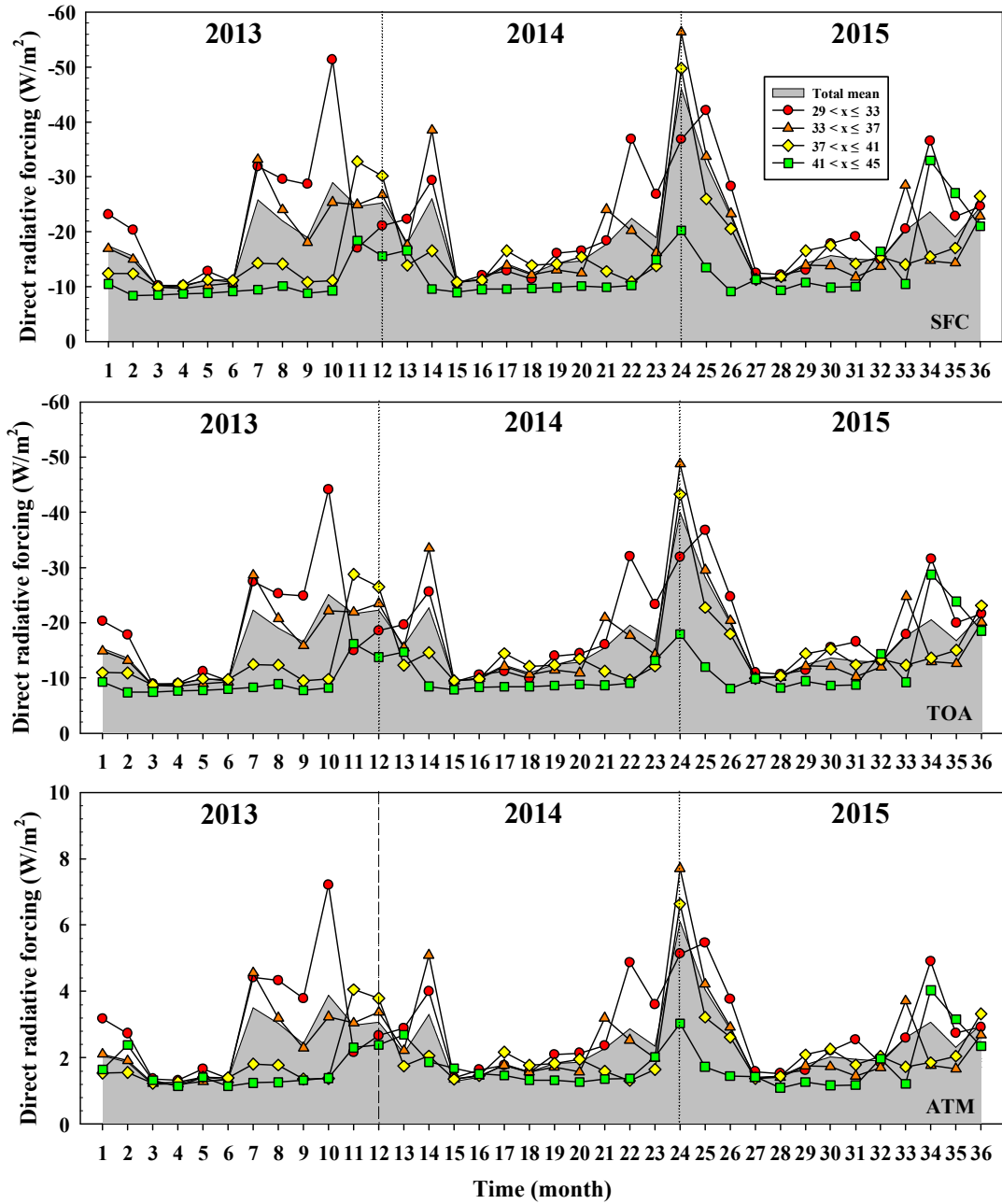


Fig. 25. Monthly variations of DRFs due to DMS-related aerosol (e.g. sulfate) at SFC, TOA, and ATM for each latitude band ( $4^\circ$  interval between  $29^\circ$  and  $45^\circ$ ) during the study period (2013–2015).



#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 3년간(2013~2015년) 인공위성(Chl-a 및 DMS 농도, SSW, SST) 및 모델링 월별 자료(MLD)를 활용하여 동아시아 해역에서의 자연적 황화합물인 DMS의 해양-대기 flux(즉 DMS flux)를 산출하였으며, 이를 통해 DMS 관련 에어로졸(DMS-related aerosol)인 황산염(sulfate) 에어로졸의 농도 및 수농도를 추정하였다. 또한 추정된 DMS 관련 에어로졸 자료를 이용하여 에어로졸의 광학특성(특히, AOD)과 직접적 복사강제력(DRF)을 추정 및 분석하였다. 이에 앞서 전반적인 DMS flux의 장기 추세 및 연변화 경향을 살펴보기 위해 16년간(2000~2015년) 전 지구 DMS flux를 산출하였다. 여기에 이용된 인공위성 및 모델링 자료는 DMS flux 산출에 필요한 주요 요소(Chl-a 및 DMS 농도, SSW, SST, MLD)의 16년간 월별 자료이다.

전 지구 DMS flux 공간분포에서는 전반적으로 2000년에서 2015년으로 올수록 감소하는 추세로 나타났으며 위도 구간별로는 중위도( $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ )보다 저위도( $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ )에서 상대적으로 높게 추정되었다. DMS flux의 연/월 변화에서는 DMS flux가 북반구와 남반구 모두  $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$  구간이 가장 높았고, 북반구  $50^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ , 남반구  $30^{\circ}\text{S}\sim 40^{\circ}\text{S}$  구간이 가장 낮게 나타났다. 또한 위도 구간별로 살펴보았을 때 SSW가 가장 유사하게 같은 위도 구간에 높고 낮음이 나타났다. DMS flux의 장기 추세 공간분포와 MK 검정에서는 북반구와 남반구 모든 해역에서 대부분 감소추세로 나타났으나, 일부 해역에서는 증가 추세가 나타났다. 또한 MK 검정에서 계절별로 북반구와 남반구의 일부 위도(북반구: 겨울철  $10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$ ,  $20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ , 남반구: 여름철  $10^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{S}$ )를 제외하고는 감소추세가 크게 나타났다.

최근 3년간(2013~2015년) 동아시아 해역에서의 DMS flux는 2013년 평균  $1.45\pm 2.38 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ , 2014년과 2015년에 각각 평균  $0.75\pm 1.03 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ,  $0.57\pm 0.68 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ 으로 나타나 전반적으로 감소하는 경향을 보였으며, 연평균 공간 분포에서는 화동지역 연안(상하이 인근)이 가장 높게 나타났다.

계절별로는 겨울>가을>여름>봄 순으로 대체로 겨울과 가을철이 높고 봄철이 가장 낮게 나타났으며, 위도 구간별로는 29°N~33°N에서 가장 높게 41°N~45°N 위도 구간이 가장 낮게 나타났다. 또한 DMS flux와 주요 요소(SST, SSW, Chl-a 및 DMS 농도)와의 관계를 분석한 결과, 주요 요소 중 SSW가 DMS flux에 가장 영향을 주는 것으로 나타났으나 일부 위도 구간(29°N~33°N)에서 DMS 농도와 SST 등의 영향도 나타나, 전반적으로 DMS flux의 시·공간 분포는 여러 요소들이 복합적으로 작용된 것으로 판단된다.

에어로졸 광학모델(OPAC)을 이용하여 대기 중 DMS 관련 에어로졸(예, 황산염)의 광학특성 중 AOD (즉 AOD (DMS)) 분포를 분석한 결과, 2013년에서 2015년으로 올수록 중국 화동지역(상하이 인근) 인근 연안에서 높은 AOD (DMS)가 나타났으며, 이는 DMS flux의 공간분포 특성과 대체로 유사하였다. 또한 계절별 평균 AOD (DMS)는 DMS flux의 영향으로 대부분 29°N~33°N에서 가장 높게 41°N~45°N 위도 구간이 가장 낮게 나타났다. 이러한 해양기원 AOD (DMS)와 Aqua 위성의 MODIS AOD(인위적 및 자연적 에어로졸 포함)를 비교한 결과, MODIS AOD는 평균 0.305(범위: 0.187~0.508)으로 나타났으며 계절별로는 봄>겨울>여름>가을 순이었다. 이와 달리, AOD (DMS)는 평균 0.045(0.021~0.135)이었으며, 계절 특성은 겨울>가을>여름>봄 순으로 추정되었다. 연구기간(2013~2015년) 동안 MODIS AOD에 대한 AOD (DMS)의 기여율은 전체 평균 16.2%(4.6%~46%)로 추정되었으며, 계절별 기여율은 겨울철이 24.1%로 가장 높고 봄철에 2.4%로 가장 낮게 나타났다.

연구기간(2013~2015년) 동안 DMS 관련 에어로졸(즉, 황산염 에어로졸)의 지표(SFC), 대기상단(TOA), 대기 중(ATM)에서의 연평균 복사강제력은 대체로 중국 화동지역(상하이 인근) 연안에서 상당히 높게 나타난 반면, 동해와 일본 인근 해역에서는 낮게 추정되었다. 또한 2013년에 비해 2015년은 중국 화동지역 인근 연안에서 음의 복사강제력이 약간 감소하는 것으로 나타났지만, 반대로 중국 산둥반도 인근 보하이 해(Bohai Sea)에서는 음의 복사강제력이 다소 증가하는 경향이였다. 계절별로는 대체로 겨울철에 음의 복사강제력이 가장 높았으며, 봄철에 가장 낮게 나타났다. 예를 들어, 2014년 12월에 SFC, TOA, ATM에서의 복사강제력은 각각  $-46.1 \pm 31.4$ ,  $-39.9 \pm 26.2$ ,  $6.1 \pm 5.3$  W/m<sup>2</sup>(2014년

겨울 평균:  $-32.9 \pm 12.8$ ,  $-28.7 \pm 10.9$ ,  $4.2 \pm 1.9$  W/m<sup>2</sup>) 으로 가장 높았으며, 2013년 3월에 각각  $-9.9 \pm 2.2$ ,  $-8.7 \pm 1.9$ ,  $1.2 \pm 0.3$  W/m<sup>2</sup>(2013년 봄 평균:  $-10.5 \pm 3.4$ ,  $-9.2 \pm 2.9$ ,  $1.3 \pm 0.5$  W/m<sup>2</sup>) 으로 가장 낮았다. 위도 구간별로는 대부분 29°N~33°N에서 가장 높게 나타나고 41°N~45°N 위도 구간이 가장 낮게 나타났다.

본 연구를 통해 전 지구 및 동아시아 해역에서의 DMS flux는 전반적으로 감소하는 추세를 확인할 수 있었고, DMS flux의 장기 추세 및 시·공간 분포에 가장 큰 영향을 주는 요소는 SSW로 추정되었으며, 일부 다른 요소(Chl-a 및 DMS 농도, SST 등)도 복합적으로 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 인공위성 및 모델링 자료를 활용하여 대상지역 격자별 DMS flux를 산출하였기 때문에(DMS flux 산출 경험식 이용), 공간적인 해상도나 MLD 및 DMS 농도의 추정치 등 여러 가지 불확실도가 내포되어 있다. 향후 보다 정확한 DMS flux의 산출 및 장기 추세를 분석하기 위해서는 중·장기간 그리고 공간적으로 보다 많은 해역에서 DMS flux와 관련된 주요 요소들의 지속적인 관측 자료의 축적이 필요하다고 사료된다. 이외에도, 연구기간동안 MODIS AOD에 대한 AOD (DMS)의 기여율은 평균 16.2%으로 다소 낮게 추정된 것으로 판단할 수 있지만, 이것은 자연적 황화합물인 DMS의 산화에 의한 황산염 에어로졸만을 고려한 것이기 때문에 1차 에어로졸인 화산폭발에 의한 먼지나 SSA(예, sea-salt 등) 등을 포함하면 자연적 에어로졸의 기여율이 더 높게 추정될 것으로 사료된다. DMS 관련 에어로졸(예, 황산염)의 직접적 복사강제력은 대상 영역에서 위도가 낮은 화동지역 연안에서 높은 음의 복사강제력이 나타났다. 대상지역 자연적인 에어로졸에 의한 복사강제력은 인위적인 에어로졸에 비해 작은 수준이지만 향후 지구복사수지 및 기후변화에 관한 보다 정확한 평가를 위해 자연적 에어로졸의 영향에 대한 상세연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- 김기현, 오재룡, 강성현, 이수형, 이강웅, 1996, 해수 및 대기 중 DMS의 중심: 마산만을 중심으로, 한국대기환경학회지, 12(4), 495-504.
- 김기현, 이강웅, 허철구 강창희, 1997, 제주도 연안해역을 중심으로 한 DMS 농도의 관측, 한국대기보전학회지, 13(2), 161-170.
- 김기현, Hillton Swan, 양규승, 김지영, 손장호, 이강웅, 강창희, 2002, 제주지역을 중심으로 한 대기 중 황화합물의 관측, 한국지구과학회지, 23(5), 416-423.
- 박연희, 송상근, 강창희, 송정민, 2017, 제주 애월 대기오염집중측정소의 PM2.5 에어로졸 화학성분 자료를 이용한 광학특성 및 직접적 복사강제력 추정 연구, 한국대기환경학회지, 33(5), 458-472.
- 박성화, 이동인, 서길중, 유철환, 장민, 강미영, 장상민, 김동철, 최창섭, 이병걸, 이어도 해양종합과학기지에서의 에어로졸 수 농도 변동, 한국환경과학회지, 18(7), 721-733).
- 장풍국, 이원제, 장민철, 이재도, 이우진, 장만, 황근춘, 신경순, 2005, 광양만에서 무기 영양염의 시공간적 분포를 조절하는 요인, Ocean and Polar Research, 27(4), 359-379.
- 정지현, 김학성, 김준태, 박용필, 최현정, 2013, 위성자료를 이용한 2001-2010년 동안의 동아시아 지역 에어로졸 직접복사강제력 분석, 한국환경과학회, 22(8), 1053-1062.
- 송상근과 손장호, 2014, 서울지역 시간별 에어로졸 자료를 이용한 화학성분별 광학특성 및 직접 복사강제력의 시간 변화 분석, 한국대기환경학회지, 30(1), 1-17.
- 최유나, 송상근, 한승범, 손영백, 박연희, 2017, 인공위성 관측 자료를 이용한 해양-대기 DMS flux 추정 및 장기 추세 분석, Ocean and Polar Research, 39(3), 181-194.
- 황길영, 이미혜, 신범철, 이강웅, 이재학, 심재설, 2008, 이어도 해양과학기지에서

- 관측된 PM2.5 농도와 이온조성, 한국대기환경학회지, 24(5), 501-511.
- Albrecht, B.A. (1989) Aerosols, Cloud Microphysics, and Fractional Cloudiness, Science, 245(4923), 1227-1230.
- Andreae, T.W., Andreae M.O., Schebeske. G., 1994, Biogenic sulfur emissions and aerosols over the tropical South Atlantic: 1. Dimethylsulfide in sea water and in the atmospheric boundary layer, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 99(D11), 22819-22829.
- Andreae, M.O., Crutzen, P.J., 1997, Atmospheric Aerosols: Biogeochemical Sources and Role in Atmospheric Chemistry, Science, 276, 1052-1058.
- Anttila, P., Tuovinen, J.P., 2010, Trends of primary and secondary pollutant concentrations in Finland in 1994-2007, Atmospheric Environment, 44, 30-41.
- Archer, S.D., Ragni, M., Webster, R., Airs, R.L., Geider, R.J., 2010, Dimethyl sulfoniopropionate and dimethyl sulfide production in response to photoinhibition in *Emiliana huxleyi*, Limnology and oceanography, 55(4), 1579-1589.
- Charlson, R.J., Lovelock, J.E., Andreae, M.O., Warren, S.G., 1987, Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate, Nature, 326, 655-661.
- Dacey, J.W.H., Blough, N.V., 1987, Hydroxide decomposition of dimethylsulfoniopropionate to dimethylsulfide, Geophysical Research Letters, 14, 1246-1249.
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., Van Dorland, R., 2007, Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B.

- Averyt, M.Tignor and H.L. Miller(eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Gabric, A.J., Ayers, G., Murray, C.N., Parslow, J., 1996, Use of remote sensing and mathematical modelling to predict the flux of dimethylsulfide to the atmosphere in the Southern Ocean, *Advances in Space Research*, 18(7), 117–128.
- Gabric, A.J., Ayers, G.P., Sander, G.C., 1995, Independent marine and atmospheric model estimates of the sea-air flux of dimethylsulfide in the Southern Ocean, *Geophysical Research Letters*, 22(24), 3521–3524.
- Gabric, A.J., Simó, R., Cropp, R.A., Hirst, A.C., Dachs, J., 2004, Modeling estimates of the global emission of dimethylsulfide under enhanced greenhouse conditions, *Global Biogeochemical Cycles*, 18(2), GB2014.
- Hess, M., Koepke, P., Schult, I., 1998, Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(5), 831–844.
- Hobbs, P.V., 1993, In *Aerosol-cloud-Climate Interactions*. Academic Press, New York, 233p.
- International Ocean-Colour Coordinating Group, IOCCG, 2004, Guide to the Creation and Use of Ocean-Color, Level-3, Binned Data product. Antonie D.(ed.), Reports of the IOCCG, No.4, IOCCG, Dartmouth, Canada, 88p.
- International Ocean-Colour Coordinating Group, IOCCG, 2007, Ocean-Colour Data Merging, Gregg W. (ed.), Reports of the No.4, IOCCG, Dartmouth, Canada, 68p.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Keller, M.D., Bellows, W.K., Guillard, R.R.L., 1989, Dimethyl sulfide production

- in marine phytoplankton, 167–182.
- Kettle, A.J., Andreae, M.O., 2000, Flux of dimethylsulfide from the oceans: A comparison of updated data sets and flux models, *Journal of Geophysical Research*, 105(D22), 26793–26808.
- Kim, K.H., Andreae, M.O., 1992, Carbon disulfide in the estuarine, coastal, and oceanic environments, *Marine Chemistry*, 40, 179–197.
- Kloster, S., Feichter, J., Maier-Reimer, E., Six, K.D., Stier, P., Wetzol, P., 2006, DMS cycle in the marine ocean-atmosphere system—a global model study, *Biogeosciences*, 3(1), 29–51.
- Kloster, S., Six, K.D., Feichter, J., Maier-Reimer, E., Roeckner, E., Wetzol, P., Stier, P., Esch, M., 2007, Response of dimethylsulfide (DMS) in the ocean and atmosphere to global warming, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 112(G03005)
- Lana, A., Bell, T.G., Simó, R., Vallina, S.M., Ballabrera-Poy, J., Kettle, A.J., Dachs, J., Bopp, L., Saltzman, E.S., Stefels, J., Johnson, J.E., Liss, P.S., 2011, An updated climatology of surface dimethylsulfide concentrations and emission fluxes in the global ocean, *Global Biogeochemical Cycles*, 25(1)
- Liss, P.S., Merlivat, L., 1986, Air-sea gas exchange rates: introduction and synthesis. In: Buat-Ménard P (ed) *The role of air-sea exchange in geochemical cycling*, Reidel Publishing Company, Dordrecht, pp 113–127.
- McClain, C.R., Feldman, G.C., Hooker, S.B., 2004, An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series, *Deep Sea Research* 51(1-3), 5–42.
- Nguyen, B.C., Mihalopoulos, N., Belviso, 1990, Seasonal variation of atmospheric dimethylsulfide at Amsterdam Island in the southern Indian Ocean, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 11, 123–141.

- Ramana, M.V., Ramanathan, V., Feng, Y., Yoon, S-C., Kim, S-W., Carmichael, G.R., Schauer, J.J., 2010, Warming influenced by the ratio of black carbon to sulphate and the black-carbon source, *Nature Geoscience*, 8(8), 542-545.
- Ramanathan, V., Carmichael, G., 2008, Global and regional climate changes due to black carbon, *Nature Geoscience*, 1, 221-227.
- Ramanathan, V., Chung, C., Kim, D., Bettge, T., Buja, L., Kiehl, J.T., Washington, W.M., Fu, Q., Sikka, D.R., Wild, M., 2005, Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102, 5326-5333.
- Rap, A., Scott, C.E., Spracklen, D.V., Bellouin, N., Forster, P.M., Carslaw, K.S., Schmidt, A., Mann, G., Natural aerosol direct and indirect radiative effects, 2013, *Geophysical research letters*, 40(12), 3297-3301.
- Ricchiazzi, P., Yang, S., Gautier, C., Sowle, D., 1998, SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 2101-2114.
- Saltzman, E.S., King, D.B., Holmen, K., Leck, C., 1993, Experimental determination of the diffusion coefficient of dimethylsulfide in water, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 98(C9), 16481-16486.
- Satheesh, S.K., Krishna Moorthy, K., 2004, Radiative effects of natural aerosols: A review, *Atmospheric Environment*, 39, 2089-2110.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N., 1998, *Atmospheric chemistry and physics-From air pollution to climate change*, John Wiley & Sons, Inc., 132pp.
- Simmonds, P.G., Derwent, R.G., Manning, A.L., Spain, G., 2004, Significant growth in surface ozone at Mace Head, Ireland, 1987-2003, *Atmospheric Environment*, 38, 4769-4778.
- Simó, R., Dachs, J., 2002, Global ocean emission of dimethylsulfide predicted



- from biogeophysical data, *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4), 1078.
- Tu, J., Wang, H., Zhang, Z., Jin, X., Li, W., 2005, Trends in chemical composition of precipitation in Nanjing, China during 1992–2003, *Atmospheric Research*, 73, 283–298.
- Wanninkhof, R., 1992, Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 97(C5), 7373–7382.
- Yang, G.P., Song, Y.Z., Zhang, H.H., Li, C.X., Wu, G.W., 2014, Seasonal variation and biogeochemical cycling of dimethylsulfide (DMS) and dimethylsulfoniopropionate (DMSP) in the Yellow Sea and Bohai Sea, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(12), 8897–8915.

# Estimation of natural marine aerosols and their climate radiative effect in the eastern Asian ocean

Yu-Na Choi

*Department of Earth and Marine Sciences, Graduate School,  
Jeju National University, Jeju, Korea*

## Abstract

In this study, The long-term trend of global sea-to-air dimethyl sulfide (DMS) flux was analyzed for 2000–2015, based on satellite observation and modeling data. In addition, DMS-related aerosol (e.g. sulfate) have been estimated using the DMS flux calculated in the east Asian ocean for the

recent three years (2013–2015). The calculation of the AOD derived from DMS flux (AOD (DMS)) and direct radiative forcing was carried out using the OPAC and SBDART.

The DMS flux in the global ocean exhibited a gradual decreasing pattern from 2000–2015. For the latitude band (10° interval between 0° and 60°), the DMS flux at the low latitude (0°–30°) in both Northern (NH) and Southern Hemispheres (SH) was significantly higher than that at the middle latitude (30°–60°). From long-term analysis with the Mann-Kendall (MK) statistical test, the trend of DMS flux mostly showed a gradual decreasing pattern (NH: except for 10°N–20°N, 20°N–30°N, in winter, SH: except for 10°S–20°S in summer).

Yearly variations in DMS flux were  $1.45 \pm 2.38$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$  in 2013,  $0.75 \pm 1.03$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$  in 2014 and  $0.57 \pm 0.68$   $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$  in 2015. The spatial distribution of annual mean DMS flux was highest in the coastal sea near Shanghai followed by Bohai sea, whereas its lowest value occurred in the East Sea. The DMS flux was higher in winter and/or fall and lower in spring during most years. For the latitude bands (4° interval between 29° and 45°), DMS flux was highest in the latitude band of 29°N–33°N and lowest at 41°N–45°N. The spatio-temporal characteristics of DMS flux were likely to be primarily affected by the SSW. However, at some latitudes, such DMS flux characteristics might be due to the combined effect of the DMS concentration and SST.

In the eastern Asian ocean during 2013–2015, the annual mean AOD derived from DMS flux (AOD (DMS)) was highest in the coastal sea near Shanghai (belong to 29°N–33°N), while its lowest value occurred in the East Sea followed by the western coastal sea near Japanese. The spatial distributions of the high AOD (DMS) (especially near Shanghai) were very or slightly similar to those of DMS flux. In addition, AOD (DMS) was highest at 29°N–33°N and lowest at 41°N–45°N, and this pattern for the latitude band

was similar to that of DMS flux. To compare the trends between AOD (DMS) and total AOD (anthropogenic and natural), we analysed the trends in both AOD ( $\tau_{550}$ ) derived from DMS flux (AOD (DMS)) and MODIS AOD ( $\tau_{550}$ ) during 2003–2015. The contribution of AOD (DMS) to MODIS AOD in the study area was estimated to be 16.2% on average (range: 4.6%–45.9%). Seasonal contribution was highest in winter (24.1%) and lowest in spring (2.4%).

The annual mean direct radiative forcing (SFC, TOA, and ATM) due to DMS-related aerosol (e.g. sulfate) were highest in the coastal sea near Shanghai, while their lowest values appeared in the East Sea followed by the western coastal sea near Japanese. during the study period (2013–2015). The negative direct radiative forcing (SFC, TOA, and ATM) showed a peak in December 2014 (a mean of  $-46.06 \pm 31.40$  (SFC),  $-39.96 \pm 26.24$  (TOA),  $6.10 \pm 5.26$  (ATM)  $\text{W/m}^2$ ) and a minimum in March 2013 ( $-8.68 \pm 1.92$  (TOA),  $1.19 \pm 0.28$  (ATM),  $-9.87 \pm 2.19$  (SFC)  $\text{W/m}^2$ ), with a highest value observed at  $29^\circ\text{N}$ – $33^\circ\text{N}$  and a lowest value at  $41^\circ\text{N}$ – $45^\circ\text{N}$ . In addition, the negative forcing was found to be higher in winter (highest) and fall than in summer and spring (lowest) during the study period. The negative radiative forcing thus suggests that the DMS-related aerosol in the target area can directly affect the change (especially, the negative impact) in the regional climate and radiative balance.