



교육학석사 학위논문

북서태평양 위성 해수면온도 자료를 활용한 해양 규모의 시공간 변동성

Spatiotemporal Variability of Oceanic Scales Using Satellite Sea Surface Temperature Data in the Northwest Pacific

2023년 2월

서울대학교 대학원

과학교육과 지구과학전공

곽 병 대

북서태평양 위성 해수면온도 자료를 활용한 해양 규모의 시공간 변동성 Spatiotemporal Variability of Oceanic Scales Using Satellite Sea Surface Temperature Data in the Northwest Pacific

지도교수 박 경 애

이 논문을 교육학석사 학위논문으로 제출함 2023 년 2 월

> 서울대학교 대학원 과학교육과 지구과학전공 곽 병 대

곽병대의 석사 학위논문을 인준함 2023 년 2 월

국문초록

해수면온도는 해양-대기의 여러 현상과 기후 변화에서 핵심 변수 이다. 해수면온도의 분포는 해양 현상의 시간적 공간적 규모를 이 해할 수 있는 중요한 단서를 제공한다. 본 연구에서는 2015년 1월 부터 2021년 12월의 인공위성 해수면온도 자료를 활용하여 북서태 평양의 해수면온도를 통해 해양 현상의 규모를 산출하고 시공간 변동성을 분석하였다. 해양 규모를 산출하기 위하여 각 격자를 포 함한 특정 범위에서 위도와 경도에 대한 공간 추세 경향성을 제거 하였으며 거리에 따른 2차원 자기상관함수를 계산하였다. 이 자기 상관함수 분포의 e-folding 되는 지점들로 타원 근사를 하여 타원 의 주요한 특성 변수인 타원중심 좌표, 장반경 길이, 단반경 길이, 장축의 경사각, 이심률, 평균반경 길이를 유도하였다. 북서태평양 의 공간 규모는 평균반경 분포에 중규모 소용돌이의 공간 규모 및 표층 해류와 해양 전선의 공간 분포 경향성이 잘 반영되었으며 장 축의 경사각과 이심률의 분포에서 해양 현상의 흐름 방향성과 형 태의 특성이 반영된 것을 확인할 수 있었다. 또한 산출한 인자들 을 분석하여 시공간 변동성을 파악한 결과 표층 해류와 해양 전선 의 특징이 반영된 계절 변동성과 경험직교함수 분석 결과 동해 및 황해에서 나타나는 경년 변동성을 도출하였다. 본 연구에서 타원 근사를 통해 도출한 해양 규모 산출값은 각 해역의 물리적 현상 및 변동성을 잘 설명할 수 있었으며 유의미한 계절 변동성과 경년 변동성을 보여주었다. 이에 다양한 기후 변화 인자와 시공간 변동 성을 비교하는 후속 연구가 필요하며 이 자료를 내삽 영역으로 적 용하여 해수면온도 합성장을 산출하거나 수치모델 입력값으로 활 용한다면 중규모 소용돌이 및 해양 현상에 대한 연구와 변화 예측

- i -

에 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 인공위성, 해수면온도, 해양규모, 자기상관, 타원근사, 변동 성

학 번 : 2021-22058

목 차

1. 서 론	1
2. 자료 및 방법	7
2.1. 위성 해수면온도 합성장 자료	7
2.2. 위·경도에 따른 공간적 경향성 제거	9
2.3. 2차원 자기상관 기법	11
2.4. 타원 근사 및 공간규모 특성 변수 산출	14
2.5. 경험직교함수(EOF) 분석	18
3. 연구 결과	19
3.1. 해수면온도 산출 해양 규모 분포 특성	19
3.1.1. 평균반경 길이	19
3.1.2. 장축의 경사각	25
3.1.3. 이심률	27
3.1.4. 시간 규모	29
3.2. 해양 규모의 계절 변동 특성	31
3.2.1. 평균반경 길이	31
3.2.2. 장축의 경사각	34
3.2.3. 이심률	36
3.2.4. 해역별 계절 변동	38

3.3. 해양 규모의 경년 변동 특성 ………………… 43

4.	요약	및	결론	47

참고문헌	49
Abstract	56

그림 목차

Figure 1. MURSST daily sea surface temperature distribution on April 1, 2021, in the studied area (20-50°N latitude and Figure 2. Oceanic current maps in the North West Pacific (Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, http://www.khoa.go.kr). 6 Figure 3. Process of removing the tendency of spatial distribution by latitude and longitude of sea surface temperature East China Sea. (a) MURSST sea surface temperature in distribution, (b) a linear spatial distribution tendency by latitude longitude, (c) calculated values that remove and spatial tendencies from (a). 10 Figure 4. The result of applying 2D autocorrelations to area of Figure 3. The black line indicates the point with the e-folding value. (a)three-dimensional а schematic and (b)а two-dimensional schematic. 13 Figure 5. The result of ellipse fitting the given e-folding value in Figure 4. The blue dot is the given e-folding value and the red line is the fitted ellipse and its semi-major, semi-minor axes. is the tilting angle. 16 Figure 6. Flow chart for making SST Spatial Scale Database.

Figure 7. Distribution of elliptical regions of ocean scale at sea surface temperature in the Northwest Pacific Ocean generated by ellipse fitting. 21 Figure 8. Distriution of average mean radius (km) in the Northwest Pacific from 1 January 2015 to 31 December 2021. Figure 9. Distriution of average semi-major axis (km) in the Northwest Pacific from 1 January 2015 to 31 December 2021. Figure 10. Distriution of average semi-minor axis (km) in the Northwest Pacific from 1 January 2015 to 31 December 2021. Figure 11. Distriution of average tilting angle (°) in the Northwest Pacific from 1 January 2015 to 31 December 2021. Figure 12. Distriution of average eccentricity in the Northwest Pacific from 1 January 2015 to 31 December 2021 28 Figure 13. Distribution of temporal scale calculated through e-folding point by autocorrelation function according to time **Figure 14.** Distriution of average monthly mean radius (km) in the Northwest Pacific from 1 January 2015 to 31 December **Figure 15.** Distriction of average monthly tilting angle (°) in the Northwest Pacific from 1 January 2015 to 31 December Figure 16. Distriution of average monthly eccentricity in the Northwest Pacific from 1 January 2015 to 31 December 2021.

Figure 17. East Sea mean radius anomaly and eccentricity anomaly time series from 2015 to 2021. 40 Figure 18. Yellow Sea mean radius anomaly and eccentricity anomaly time series from 2015 to 2021. 41 Figure 19. Time series of El Nino and La Nino periods expressed through the MEI index. 42 Figure 20. (a) Spatial distribution of eigenvectors and (b) temporal variability of the amplitude from the first EOF mode using East Sea mean radius anomaly data from 2015 to 2021. and (c) month-year plot of (b). 45 Figure 21. (a) Spatial distribution of eigenvectors and (b) temporal variability of the amplitude from the first EOF mode using Yellow Sea mean radius anomaly data from 2015 to 2021. and (c) month-year plot of (b). 46 1. 서 론

해수면온도(sea surface temperature)는 해양-대기 상호작용으로 발생 하는 여러 현상을 설명하는 중요한 변수 중 하나이다(Dolon et al., 2007). 해수면온도의 분포로부터 해양 표층에서 나타나는 여러 해양 현 상이 관측되며 해류와 열전선의 분포 및 중규모 소용돌이(eddy)의 분포 가 해수면온도 분석을 통해 파악되고 있다(Park et al., 2004; Zhang et al., 2014). 또한 해양의 표층에서는 대기와 상호작용이 활발하게 발생하 고 있어 해양과 대기 간의 에너지와 물질의 교환이 발생한다. 발생한 해 양-대기 열속(heat flux) 교환은 전 지구 규모의 지구 열수지의 변화와 국지적 열수지 변화를 유발하며 해수면온도를 통해 이러한 전 지구적, 지역적 기후 변화에 대한 예측이 가능하다(Wentz and Schabel, 2000; Casey and Cornillon, 2001). 이러한 이유로 최근 급격하게 발생하는 기 후 변화에 대한 이해 및 예측을 위해 적용되는 수치모델에도 해수면온도 가 입력 인자로 중요하게 사용되고 있다(Brasnett, 1997; Emery et al., 2001).

해수면온도는 관측기기를 사용하여 목표로 하는 지점에서 실제로 관 측을 하는 방법과 인공위성을 통해 목표 지역으로부터 수신된 자료를 변 환하여 파악하는 방법이 있다. 관측기기를 활용하여 실제 관측을 진행하 는 방법은 관측이 진행되는 시기와 영역의 제약이 있다는 단점이 있다. 반면 인공위성을 이용하는 방법은 비교적 공간적, 시간적 제약이 적기 때문에 실측을 통해 얻은 자료에 비하여 연속적이고 지속적인 자료를 산 출할 수 있다는 장점이 있다. 해수면온도를 관측하는 인공위성 센서의 종류는 사용하는 파장 영역에 따라 적외 센서와 마이크로파 센서로 나뉜 다. 적외 센서는 10-12 µm의 영역에서 1 km 이하의 공간 해상도와 0.2 K의 정확도를 보여 고해상도로 해수면온도를 산출한다(Castro et al., 2005). 그러나 적외 센서는 구름이나 에어로졸과 같은 부유입자를 투과

- 1 -

하지 못하여 대기 현상에 크게 영향을 받는다. 반면 마이크로파 센서는 50 km 이하의 공간 해상도와 0.4-0.7 K의 낮은 정확도를 나타내지만 전 천후 특성을 가지고 있다는 장점이 있다(Gentemann, 2014). 적외선 영역 에서 산출되는 해수면온도 자료는 1978년부터 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)센서를 이용하여 산출되기 시작했다. AVHRR은 미국의 국립해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration. NOAA)에서 발사한 극궤도 위성 NOAA-6부터 NOAA-19에 탑재되었으며 유럽기상위성개발기구(European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites. 발사한 EUMETSAT)에서 Meteorological Operational-A/B/C (MetOp-A/B/C)에도 탑재되어 관측이 수행되었다. 이후 미국항공우주국 (National Aeronautics and Space Administration. NASA)의 Terra와 Aqua에 탑재된 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Suomi-National Polar-orbiting Partnership (Suomi-NPP)와 NOAA-20에 탑재된 Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) 등의 센서로 적외 영역 해수면온도가 산출되고 있다. 마이크로 파를 이용하여 산출되는 해수면온도 자료 또한 1978년 NASA의 Nimbus-7과 Seasat의 센서 Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR)부터 산출되기 시작하였다. 이후 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)의 TRMM Microwave Imager (TMI), Advanced Earth Observing Satellite 2 (ADEOS II)의 Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR), Global Precipitation Measurement (GPM)의 GPM Microwave Imager (GMI) 등의 마이크로 파 센서를 통해 해수면온도가 산출되고 있다.

여러 국외 기관에서는 적외선과 마이크로파를 이용하는 두 가지 센서 를 탑재한 인공위성으로 산출한 해수면온도 자료와 실측 해수면온도 자 료를 통해 해수면온도 합성장을 생산한다(Sakurai et al., 2005; Merchant et al., 2014). 해수면온도 합성장은 주로 시간평균법과 최적 내삽법(OI; Optimum Interpolation)을 활용하여 생성된다. 최적 내삽법은

- 2 -

공간적으로 주어진 특정 영역 내부의 여러 인공위성 자료를 활용하여 내 삽을 시행하는 것으로 산출 오차를 최소화하며 공백이 없는 자료를 생산 한다. 이때 각 격자의 해수면온도 값을 형성하기 위해 내삽을 진행하는 영역을 설정한다. 이렇게 설정한 window 내부의 자료들을 내삽하여 목 표로 하는 격자의 해수면온도 값을 산출하는데 이 과정에서 신뢰성이 높 은 관측 정보에 가중치를 적용한다. 하지만 대부분의 연구에서 내삽을 시행하는 window의 크기를 특정 값으로 설정하여 연구 해역의 모든 구 간에 적용하고 있다. 그러나 실제 해양에서 나타나는 해양 현상의 수평 적 공간 규모는 기후 변화의 영향을 받으며 기후 모델에 중요한 입력 값 으로 작용하기 때문에 내삽을 시행하는 window의 크기를 모두 일정하 게 설정할 경우 각 지점마다 실제 해양에서 나타날 수 있는 해양 현상의 수평적 규모가 다른 점이 생성되는 해수면온도 합성장에 고려되지 못한 다는 한계점이 있다(Park and Kim, 2009; Sidder, 2022). 이에 각 지점에 서 발생하는 실제 해양 현상의 물리적 특성을 반영할 수 있는 window 를 설정하여 최적 내삽법을 적용할 필요가 있다.

인공위성으로부터 산출한 해수면온도 합성장 자료는 다양한 표층 해 류의 분포 및 특성을 분석할 수 있다(Barton, 1995). FIgure 1은 북서태 평양의 해수면온도 분포이며 Figure 2는 같은 해역에서 흐르는 표층 해 류의 분포이다. 북서태평양 영역에는 Figure 2와 같이 다양한 표층 해류 가 흐르고 있으며 해양 순환을 구성하는 중요 요소로서 지구환경의 변화 에 중요한 역할을 한다(Park et al., 2020). 또한 해수면온도 증가는 해양 의 순환을 이루는 해류의 세기를 강하게 하여 해양 현상의 규모를 변화 시킨다(Voosen, 2020). 표층 해류 이외에도 해양 현상의 규명에 중요하 게 작용되는 중규모 소용돌이 또한 해양의 열 교환 및 해양-대기 열 속 의 영향을 받아 공간규모가 변화한다(Griffies et al., 2015; Abel et al., 2017; Kamenkovich et al., 2017). 이처럼 해수 표면의 현상은 해양 현상 의 변화를 활발히 유발하지만 표층 해양의 규모에 대한 공간적 연구는 활발히 이루어지지 않았다. 이에 인공위성 산출 해수면온도로 표층 해양 의 규모 변동성 분석을 통해 실제 해양 현상의 변화를 파악하기 위한 시

- 3 -

도 및 연구가 필요하다.

본 연구에서는 2015년 1월 1일부터 2021년 12월 12일까지의 MURSST 인공위성 해수면온도 합성장 자료를 활용하여 북서태평양 해 역의 해양 규모를 2차원 자기 상관 기법과 타원 근사를 활용하여 산출하 였다. 이를 통해 내삽을 진행하는 window를 타원으로 적용하여 서로 다 른 해역의 물리적 특성을 반영할 수 있는 내삽 window를 제시하고 해 양 규모의 시공간 변동성 분석을 통해 해양 현상의 변화 양상을 파악하 고자 한다.



Figure 1. MURSST daily sea surface temperature distribution on April 1, 2021, in the studied area (20–50°N latitude and 110–150°E longitude).



Figure 2. Oceanic current maps in the North West Pacific (Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, http://www.khoa.go.kr).

2. 자료 및 방법

2.1. 위성 해수면온도 합성장 자료

국내외 다양한 기관은 여러 인공위성 해수면온도 자료와 직접 관측을 통한 실측 자료로 해수면온도 합성장 자료를 생산하고 있다. 기관들은 생산하는 합성장 자료의 정확도를 높이기 위하여 다양한 파장 영역의 센 서와 서로 다른 공간적·시간적 해상도를 가진 다중위성의 산출 해수면온 도 자료를 적용하여 생산한다(Guan and Kawamura, 2004). 유럽 기상청 (Meteorological Office; Met Office)에서는 OSTIA(Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis) 해수면온도 합성장 자료를 생산하고 있으며 NOAA는 OISST(Optimum Interpolation Sea Surface Temperature)를 생산한다. 또한 캐나다 기상청의 CMC SST(Sea Surface Temperature analysis of Canadian Meteorological Centre)와 일 본 기상청의 MGDSST(Merged Satellite and in-situ Data Global Daily Sea Surface Temperature)가 있다. 본 연구에서 활용한 위성 해수면온 두 합성장은 NASA의 제트 추진 연구소(JPL; Jet Propulsion Laboratory)에서 생산한 MURSST(Multi-scale Ultra-high Resolution Sea Surface Temperature)자료이며 전 지구 범위에 대하여 공백이 없는 Level 4 자료이다.

인공위성 해수면온도 합성장인 MURSST에 입력자료로 활용된 인공 위성 자료는 NASA에서 2002년에 발사한 인공위성 Aqua에 탑재된 AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS)와 MODIS 의 해수면온도 자료, 일본 우주항공연구개발기구(Japan Aerospace eXploration Agency; JAXA)이 2012년에 발사한 인공위성 GCOM-W(Global Change Observation Mission-Water)에 탑재된 AMSR-2의 해수면온도, 미 해군의 WindSat, NOAA 인공위성의

-7 –

AVHRR 해수면온도 자료가 있다. MURSST는 1 km (1°)의 공간 해상 도와 24시간의 시간 해상도를 가진다. 본 연구에서는 2015년 1월 1일부 터 2021년 12월 31일까지의 자료를 사용하였으며 연구지역은 위도 20-50°N과 경도 110-150°E의 북서태평양 해역이다.

2.2. 위·경도에 따른 공간적 경향성 제거

연구 해역 내 각 지점의 해수면온도 공간규모를 산출하기 위하여 각 지점을 기준으로 일정한 크기의 계산영역을 설정하여 해당 영역에 2차원 자기 상관 기법을 적용하였다. 2차원 자기상관 기법을 적용할 계산영역 은 기존 연구에서 산출된 평균 e-folding 공간규모인 남북방향 850 km 와 동서방향 615 km에 따라 각 지점을 중심으로 하는 남북·동서 방향 800 km의 영역으로 설정하였다(Reynolds and Smith, 1994).

계산영역을 설정한 후 해수면온도 합성장 자료에서 위도와 경도에 의 한 공간적 분포 경향성을 제거하는 과정을 진행하였다. 해수면온도는 저 위도에서 높은 값이 나타나고 고위도에서 낮은 값이 나타나는 것처럼 지 역적 요인에 의한 분포특성을 가지고 있으므로 이러한 지역적 효과를 제 거하는 과정이 필요하다. 각 지점을 중심으로 하는 계산영역의 해수면온 도 값을 위도와 경도를 변수로 하는 일차식에 식 (1)과 같이 근사하여 위도 및 경도에 따른 공간적 경향성을 산출하였다. 이후 식 (2)의 과정을 따라 산출한 공간적 경향성을 계산영역의 기존 해수면온도에서 뺀 값을 통해 경향성을 제거한 결과를 산출하였다.

$$SST_{fitted} = AX + BY + C \tag{1}$$

$$SST_{detrended} = SST - SST_{fitted}$$
 (2)

SST는 계산영역의 초기 해수면온도 값을 나타내며 SST_{fitted}는 위도 와 경도를 변수로 하는 일차식으로 근사된 해수면온도의 공간적 경향성 이다. 또한 SST_{detrended}는 이러한 경향성이 제거된 결과 값이며 X는 위 도, Y는 경도를 나타낸다. Figure 3은 일본 남서부의 쿠로시오 해류가 통과하는 지역을 예시로 계산영역의 해수면온도 자료에서 공간적 경향성 을 제거하는 과정을 나타내어 도시한 것이다.



Figure 3. Process of removing the tendency of spatial distribution by latitude and longitude of sea surface temperature in East China Sea. (a) MURSST sea surface temperature distribution, (b) a linear spatial distribution tendency by latitude and longitude, (c) calculated values that remove spatial tendencies from (a).

2.3. 2차원 자기상관 기법

설정한 계산영역 내에서 해양환경의 형태와 규모를 파악하고자 2차원 자기상관(2-D Autocorrelation)을 시행하였다. 2차원 자기상관 기법은 주 어진 영역내의 각 자료들과 중앙 자료의 유사성을 판단하는 기법이다. 이러한 과정을 통해 각 자료들의 상관계수를 도출하여 중앙 값과 유사한 값을 가지는 영역의 크기를 결정한다. 기존 다양한 연구에서 중규모 해 양 현상을 분석하기 위하여 공간적 2차원 자기상관 기법을 적용하였다 (Woert, 1982). 영역 내 각 값들의 상관계수를 도출하는 2차원 자기상관 과정은 식 (3)과 같다. *C*는 2차원 자기상관으로부터 산출된 상관계수 값 이고 *N*과 *M*은 계산 영역의 각 방향 격자 크기이다. *i*, *j*는 상관계수를 산출하고자 하는 지점의 좌표이며 *n*과 *m*은 공간적 lag의 크기이다.

$$C(i,j) = \frac{1}{C(0,0)NM} \sum_{i=0}^{N-n-1} \sum_{j=0}^{M-m-1} T(i,j) T(i+n,j+m)$$
(3)

Wiener (1930)와 Khinchin (1934)은 Einstein의 이론을 정리하여 시간 영역에서의 자기상관과 주파수영역에서의 스펙트럼밀도는 푸리에 변환 관계가 성립함을 증명하였다(Leibovich and Barkai, 2015). 원함수 E(t)에 대한 자기상관함수 C(t)를 식 (4)와 같이 정의한 후, 식 (5)와 같이 원함수를 푸리에 변환하고 식 (6)과 같이 복소 켤레 값으로 변환하였다.

$$C(t) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \overline{E}(\tau) E(t+\tau) d\tau$$
(4)

$$E(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} E_{\nu} e^{-2\pi i\nu\tau} d\nu \tag{5}$$

$$\overline{E}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \overline{E}_{\nu} e^{2\pi i\nu\tau} d\nu \tag{6}$$

- 11 -

이후 식 (5), (6)을 식 (4)에 대입하여 전개하면 식 (7)과 같은 과정에 의하여 자기상관함수는 원함수 제곱의 푸리에 변환 꼴로 표현된다 (Cohen, 1998).

$$C(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \overline{E}_{\nu} e^{2\pi i \nu \tau} d\nu \right] \left[\int_{-\infty}^{\infty} E_{\nu'} e^{-2\pi i \nu' (t+\tau)} d\nu' \right] d\tau$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{E}_{\nu} E_{\nu'} e^{-2\pi i \tau (\nu'-\nu)} e^{-2\pi i \nu' t} d\tau d\nu d\nu'$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{E}_{\nu} E_{\nu} \delta(\nu'-\nu) e^{-2\pi i \nu' t} d\nu d\nu'$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \overline{E}_{\nu} E_{\nu} e^{-2\pi i \nu t} d\nu$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \left| E_{\nu} \right|^{2} e^{-2\pi i \nu t} d\nu$$

$$= F\left[\left| E_{\nu} \right|^{2} \right](t)$$
(7)

이후 2차원 자기상관 기법을 적용한 결과에서 e-folding 지점을 통해 타원 근사를 진행하기 위해 e-folding 값이 나타나는 지점을 산출하였다. Figure 4는 Figure 3의 영역을 위의 2차원 자기상관함수를 적용하여 도 출한 결과를 도시한 것이다. 2차원 자기상관 기법 적용 결과 산출된 상 관계수의 분포에서 e-folding 지점을 파악하여 검은색 실선으로 표기하 였다.



Figure 4. The result of applying 2D autocorrelations to area of Figure 3. The black line indicates the point with the e-folding value. (a) a three-dimensional schematic and (b) a two-dimensional schematic.

2.4. 타원 근사 및 공간규모 특성 변수 산출

해양 규모를 나타내는 특성 변수를 산출하기 위하여 2차원 자기상관 함수의 적용 결과 값으로부터 파악한 e-folding 지점으로 타원 근사를 시행하였다. 본 연구에서는 최소 자승법(least sqaures criterion)을 활용 하여 타원 근사를 시행하였다(Hooker and Olson, 1984; Park et al., 2012). 일반적으로 2차원에서 타원의 방정식은 식 (8)과 같이 표현하며 이를 식 (9)와 같은 극 좌표계로 변형할 경우 식 (10)과 같이 표현된다.

$$ax^{2} + bxy + cy^{2} + dx + ey + f = 0$$
(8)

$$x' = x\cos\theta + y\sin\theta, \ y' = -x\sin\theta + y\cos\theta \tag{9}$$

$$x^{2}(a\cos^{2}\theta - b\cos\theta\sin\theta + c\sin^{2}\theta) + xy(2a\cos\theta\sin\theta + (\cos^{2}\theta - \sin^{2}\theta)b - 2c\cos\theta\sin\theta) + y^{2}(a\sin^{2}\theta + b\cos\theta\sin\theta + c\cos^{2}\theta) + x(d\cos\theta - e\sin\theta) + y(d\sin\theta + e\cos\theta) + f = 0$$
(10)

이때 타원의 장반경길이와 단반경길이 등을 파악하기 위하여 장축이 *x* 축에 수평하여 장축의 경사각이 0°라고 가정할 경우 *xy* 항은 존재하 지 않으므로 *xy* 항의 계수가 0이어야 한다. 이때 실제 근사된 타원은 장 축이 *x* 축에 수평하지 않고 기울어진 타원의 형태를 갖기 때문에 식 (11) 과 같이 *xy* 항의 계수가 0이 되는 장축의 경사각 *θ*가 산출된다.

$$2a\cos\theta\sin\theta + (\cos^2\theta - \sin^2\theta)b - 2c\cos\theta\sin\theta = 0$$
$$\theta = \frac{1}{2}a\tan\left(\frac{b}{c-a}\right) \tag{11}$$

이러한 과정을 거쳐 산출된 장축의 경사각 θ는 식 (10)에 적용되어

근사한 타원을 장축이 *x*축에 평행한 타원으로 변형시킬 수 있어 여러 타원 요소들을 산출할 수 있다.

$$X_{0} = \frac{d}{2a}, \quad Y_{0} = \frac{e}{2c}, \quad A = \sqrt{\left|\frac{f}{a}\right|}, \quad B = \sqrt{\left|\frac{f}{c}\right|}$$
(12)
$$ecc = \frac{\sqrt{A^{2} - B^{2}}}{A}, \quad R = \sqrt{AB}$$
(13)

X₀는 타원의 중심 *x*좌표, Y₀는 타원의 중심 *y*좌표이며 A는 장반경 의 길이, B는 단반경의 길이이다. 또한 이심률 ecc와 타원의 평균반경 R을 식 (13)과 같이 산출하였다. Figure 5는 Figure 4에서 주어진 e-folding 지점 좌표에 근사된 타원과 장축의 경사각을 도시한 것이다. Figure 6은 본 연구에서 위성 해수면온도 자료를 활용하여 해양 공간 규 모를 산출한 과정을 타나낸 것이다.



Figure 5. The result of ellipse fitting the given e-folding value in Figure 4. The blue dot is the given e-folding value and the red line is the fitted ellipse and its semi-major, semi-minor axes. θ is the tilting angle.



FIgure 6. Flow chart for making SST Spatial Scale Database.

2.5. 경험직교함수(EOF) 분석

생산한 위성 해수면온도 자료 기반 해양 규모의 시계열에 따른 변동 성을 분석하기 위하여 경험직교함수(Empirical Orthogonal Function. EOF)를 활용한 분석법을 사용하였다. EOF 분석은 주성분 분석 (Principal Component Analysis, PCA)와 같은 개념으로 고차원 자료를 독립 EOF로 분해하는 방식이다. EOF 분석을 시행하고자 하는 시계열을 포함한 고차원 자료를 *D* 라고 하고 *x*, *y*를 좌표, *t*를 시간이라고 할 때 EOF 분해과정은 식 (14)와 같다.

$$D(x,y,t) = \sum_{m=1}^{M} \phi_m(x,y) A_m(t)$$
(14)

φ는 각 mode에 대한 고유벡터(eigenvector)의 공간적 분포함수이며
A는각 mode에 대한 진폭(amplitude) 시계열이다. m은 EOF mode, M
은 mode의 개수이다.

3. 연구 결과

3.1. 해수면온도 산출 해양 규모 분포 특성

2015년 1월 1일부터 2021년 12월 31일까지 총 7개년의 MURSST Level 4 해수면온도 합성장 자료를 수집하였고 북서태평양 영역에서 해 양 규모를 산출하였다. 구축한 해양 공간 규모 데이터베이스에는 타원의 중심 좌표, 장반경 길이, 단반경 길이, 평균반경 길이, 장축의 경사각, 이 심률이 포함되었다. Figure 7은 데이터베이스를 산출하기 위해 근사한 타원의 형태와 분포를 나타낸 것이다.

3.1.1. 평균반경 길이

FIgure 8-10은 북서태평양 해역에서 2015년 1월 1일부터 2021년 12월 31일까지 각 지점의 평균반경 길이, 장반경 길이, 단반경 길이의 평균값을 산출하여 공간분포를 나타낸 것이다. Figure 8에서 일본 남동부의 태평양 지역이나 황해의 북쪽과 서쪽 연안, 동해의 연안부와 같은 대부분 영역의 평균반경 길이가 약 100 km 이하의 값으로 나타난다. 그러나 쿠 로시오해류가 통과하는 해역이나 동해 중앙부 및 동중국해의 열전선이 형성되는 지역, 황해난류가 흐르는 지역인 서쪽 연안에서는 120 km 이 상의 평균반경이 나타난다. 특히 쿠로시오해류가 태평양 외해와 연결되는 지점인 위도 35°N, 경도 135°E 부근에서는 160 km 이상의 매우 큰 평균반경 길이가 산출되었다.

기존 연구에 따르면 중규모 소용돌이는 일반적으로 25-200 km 반지 름의 공간규모로 분포한다(Faghmous et al., 2015). 또한 북서태평양 해 역에서 관측되는 중규모 소용돌이는 약 10-75 km 반지름의 공간규모를 가지며 위도가 증가함에 따라 공간규모가 작아지는 분포를 가진다(Park et al., 2012; Xu et al., 2019). Figure 8에서는 이러한 기존연구에 부합하는 평균반경이 나타난다. 분포에서 나타나는 평균반경의 상한 값과 하한 값이 각각 180 km와 50 km 정도로 기존 연구 결과와 일치한다. 해류가 통과하거나 열전선이 위치한 해역을 제외한 지역의 평균반경의 분포 또한 기존 연구에서 제시된 북서태평양의 중규모 소용돌이 규모와 유사하게 나타난다. 이러한 지역의 평균반경 길이를 위도에 따라 분석해보면, 위도 30°N 이하의 지역에서는 약 80 km 이상의 값이 나타나지만 위도 35°N 이상의 지역에서는 70 km 이하의 값이 산출되며 황해 북쪽 해안에서는 60 km 이하의 평균반경이 분포하고 있어 위도가 증가할수록 중규모 소용돌이의 공간규모가 감소하는 기존 연구 결과와 같은 양상을 볼 수 있다. 이러한 양상은 평균반경 뿐 아닌 장반경 길이(Figure 9)와 단반 경 길이(Figure 10)의 분포에서도 볼 수 있다.

Figure 8에서 120 km 이상의 평균반경이 산출되는 쿠로시오해류, 황 해난류가 통과하는 해역과 열전선이 나타나는 동해 중앙부 해역과 동중 국해는 표층 해류나 열전선과 같은 특정 방향성을 나타내며 발생하는 해 양 현상이 위치한 해역이다. 이러한 해역에서는 해수면온도 값이 유사한 영역이 길게 늘어진 장반경 길이가 매우 큰 형태를 갖는다(Figure 9). 2 차원 자기상관 기법을 적용하여 e-folding 지점을 타원 근사할 경우 이 러한 형태가 반영되어 이심률이 매우 크고 장반경의 길이가 특히 긴 타 원이 형성될 것이다. 따라서 해당 영역들에서 큰 공간규모가 산출되는 것과 이외의 영역에서는 기존 중규모 소용돌이 공간규모에 대한 연구 결 과와 일치하는 것으로 미루어 해수면온도 평균반경의 분포는 실제로 발 생하는 해양 현상의 물리적 특성을 잘 반영한다고 판단할 수 있다.



FIgure 7. Distribution of elliptical regions of ocean scale at sea surface temperature in the Northwest Pacific Ocean generated by ellipse fitting.



Figure 8. Distriution of average mean radius (km) in the Northwest Pacific from 1 January 2015 to 31 December 2021.



Figure 9. Distriution of average semi-major axis (km) in the Northwest Pacific from 1 January 2015 to 31 December 2021.



Figure 10. Distriution of average semi-minor axis (km) in the Northwest Pacific from 1 January 2015 to 31 December 2021.

3.1.2. 장축의 경사각

Figure 11은 북서태평양 해역에서 2015년 1월 1일부터 2021년 12월 31일까지의 자료로부터 산출된 장축의 경사각의 평균 분포이다. 장축의 경사각은 x축 양의 방향에서 시계반대방향으로 장축까지의 각도로 정의 하였다(Figure 5). 평균 장축의 경사각의 공간분포를 분석하면 일본 남동 쪽 동중국해 해역과 일본 남쪽 및 동쪽 연안, 동해 남쪽 해역에서 평균 장축의 경사각이 주로 45°의 값으로 나타난다. 이는 실제로 동중국해 및 일본 남동쪽 해역에는 쿠로시오해류, 동해 남쪽 해역에서는 대마난류가 통과하고 있으며 쿠로시오해류와 대마난류가 북동쪽을 향해 흐르고 있는 현상이 잘 반영된 것으로 볼 수 있다. 동해 북쪽 연안 또한 평균 장축의 경사각이 약 45°로 산출된 것을 볼 수 있는데 이 해역을 통과하는 해류 인 연해주한류가 쿠로시오해류와 대마난류와 방향은 반대이지만 평균 장 축의 경사각은 45°로 동일한 남동쪽을 향해 흐르는 것이 반영된 결과이 다. 황해의 평균 장축의 경사각은 동중국해에서 약 45°의 값이 나타나는 것을 시작으로, 한반도 남동쪽 해역에서 약 90°, 황해 중앙 및 북쪽 해역 에서 약 135°의 값이 산출되어 연속적으로 해양 현상 흐름의 방향이 변 화하는 양상을 유추할 수 있다. 이는 황해 및 동중국해에 흐르는 해류에 대한 기존 연구에서 제시하는 해류의 방향과 일치하는 것이다(Park et al., 2017).

평균 평균반경의 분포가 해양 현상의 공간규모를 효과적으로 반영한 것에 반해 평균 장축의 경사각의 분포에는 공간적 길이가 포함되지 않기 때문에 해양 현상의 공간규모는 효과적으로 반영하지 못한다. 그러나 평 균 장축의 경사각 분포에는 평균 평균반경의 분포에서 반영되지 못하는 해류의 흐름과 같은 해양 현상의 진행 방향이 반영되고 있으므로 장축의 경사각이 평균반경과 함께 고려될 경우 더욱 정확한 해양 현상을 반영할 수 있을 것으로 예상된다.



Figure 11. Distriution of average tilting angle (°) in the Northwest Pacific from 1 January 2015 to 31 December 2021.

3.1.3. 이심률

Figure 12는 북서태평양 해역에서 2015년 1월 1일부터 2021년 12월 31일까지의 자료로부터 산출된 이심률의 평균 분포이다. 이심률은 0에서 1 사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 타원의 형태가 길게 늘어진 것이다. 산출된 평균 이심률 분포에서는 7 개년 이심률 값을 평균하는 과정에서 0.5 이하의 이심률이 산출되지 않았다. 평균 이심률은 주로 대만 주변 해역과 일본 동쪽 해역 및 동해 남쪽 해역에서 0.8 이상의 큰 값이나타나고 있으며 쿠로시오해류와 대마난류가 흐르는 해역에서 0.7 이상의 평균 이심률이 산출된다. 이는 일정한 방향을 따라 흐르는 해류의 특성에 의하여 비교적 이심률이 큰 형태의 타원이 근사되었기 때문이라고 볼 수 있다. 하지만 황해에는 약 0.6의 비교적 낮은 평균 이심률이 나타나고 있는데, 이는 황해의 표층 해류들은 계절 변동성이 크고 여러 갈래의 해류가 복잡하게 흐르기 때문에 강한 주요 해류가 비교적 적은 계절 변동성으로 흐르는 동해나 동중국해의 해역에 비하여 길지 않은 형태의 타원으로 근사 된 것으로 추정된다(Xu et al., 2009).

평균 이심률의 분포에는 각 해역에서의 해양 현상이 나타나고 있는 형태가 반영되고 있다. 이러한 특성으로 인하여 이심률의 분포를 분석하 면 평균반경으로부터 분석한 해양 현상의 공간규모, 장축의 경사각으로 부터 분석한 해양 현상의 방향성과 종합하여 더욱 정확한 해양 환경을 파악하는 것이 가능하다. 또한 위의 세 변수를 통하여 합성장의 최적 내 삽법에 사용 될 수 있는 타원 형태의 내삽 window를 결정할 수 있다. 평균 이심률 분포에서 0.5 이하의 이심률이 도출되지 않으므로 기존 연 구에서 사용한 일정한 크기의 원형 내삽 window는 실제 해양 환경을 충분히 반영하지 못하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 타원 형태의 영역 을 활용하여 내삽 window를 설정한다면 앞서 분석한 해수면온도 공간 규모 자료에 반영된 실제 해양 현상의 특성들이 합성장 생성 과정에서 효과적으로 반영될 수 있을 것이다.



Figure 12. Distriution of average eccentricity in the Northwest Pacific from 1 January 2015 to 31 December 2021.

3.1.4. 시간 규모

Figure 13은 2015년 1월 1일부터 2021년 12월 31일까지 시간에 따른 해수면온도의 시간 규모를 산출하여 공간적 분포를 나타낸 것이다. 각 격자의 해수면온도를 시계열에 따라 자기상관함수를 적용하여 e-folding 지점의 일수를 시간 규모로 정의하였다. 전반적으로 40일 이하의 시간 규모를 나타내고 있으나 동해 북서쪽 해역과 일본 남쪽 해역에 약 90일 이상의 시간 규모를 보이는 지역이 나타난다.

일본 남쪽 큰 시간 규모를 가진 해역은 쿠로시오 해류가 흐르는 해역 이다. Figure 2에 제시 된 북서태평양의 해류 모식도에 따르면 쿠로시오 해류의 경우 위도 32°N 경도 138°E의 위치에서 그 경로가 변경되기도 한다. 이때 FIgure 2에 점선으로 표기되었던 경로는 Figure 13에서 시간 규모가 매우 크게 나타난 해역과 매우 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있 다. 시간 규모가 주변 지역보다 크게 나타나는 것은 해당하는 지역의 해 양 현상이 주변에 비해 비교적 오랫 동안 유지되고 있다는 것을 의미한 다. 이에 2015년부터 2021년 7년의 기간 동안 쿠로시오 해류가 Figure 2 에서 점선으로 표기한 경로를 통해 비교적 뚜렷하고 긴 시간 동안 흐름 이 유지되었음을 유추할 수 있다.

동해 북서쪽 해역은 중규모 소용돌이가 활발하게 생성되는 지역이다. 인공위성 고도계 자료를 활용하여 중규모 소용돌이를 분석한 기존 연구 에 따르면 해당 해역은 약 126일의 수명을 보여주는 anticyclonic 소용돌 이와 약 72일의 수명을 보여주는 cyclonic 소용돌이가 주로 분포한다 (Lee et al., 2019). 이는 해당 지역의 시간 규모가 약 70-110일 사이의 값으로 도출된 것과 비교적 일치하는 수치로 e-folding 지점을 통한 시 간규모의 산출 방식이 효과적이라고 판단할 수 있다.



Figure 13. Distribution of temporal scale calculated through e-folding point by autocorrelation function according to time series from 2015 to 2021.

3.2. 해양 규모의 계절 변동 특성

3.2.1. 평균반경 길이

해수면온도 자료로부터 산출한 해양 공간 규모 분포의 계절 변동성을 파악하기 위하여 공간 규모 특성 변수인 평균반경 길이, 장축의 경사각, 이심률의 월별 평균 값의 분포를 분석하였다. Figure 14-16은 각각 평균 반경 길이, 장축의 경사각, 이심률의 월별 평균 값을 월별로 도시한 것이 다. Figure 14의 12월부터 5월까지 분포를 분석하면 동중국해와 일본 남 동부 해안에서 평균반경이 200 km에 달하는 큰 공간규모가 나타난다. 동중국해 해양 전선이 위치한 지역의 평균반경은 12월 겨울이 되며 증가 하기 시작하여 4월에 가장 넓은 영역에 걸쳐 공간규모의 최고 값을 보여 준다. 이후 5월부터 해당 해역의 평균반경이 감소하기 시작하여 여름인 8월에는 80 km 이하의 공간규모로 최저 값을 나타낸다. 9월 이후 다시 해당 해역의 평균반경 길이가 증가하기 시작하여 해양 전선이 위치한 지 역의 계절 변동성이 평균반경 길이 월별 평균 분포에서 뚜렷하게 나타나 는 것을 볼 수 있다.

황해와 동중국해 해역은 계절 변동이 크게 나타나는 지역이다. 특히 황해와 동중국해의 해양 전선은 큰 계절 변동성을 뚜렷하게 보여주며 겨 울에 해양 전선의 세기가 강해지며 여름에는 약해진다(Cao et al., 2021). 겨울부터 봄의 기간에는 황해와 동중국해의 해양 전선의 분포 지역이 넓 어지고 그 세기가 강해져 동중국해와 일본 남동부 해안에 뚜렷한 해양 전선이 형성된다(Hickox et al., 2000). 황해와 동중국해의 평균반경 길이 의 분포에서 나타나는 계절변동은 이러한 해양 전선의 계절변동이 반영 된 결과라고 판단된다.

평균반경 길이의 분포를 통해 나타나는 해양 규모의 계절 변동은 동 중국해의 해양 전선 뿐 아니라 아극전선이 위치한 동해 중앙부에서도 나 타난다. 일반적으로 아극전선은 겨울에 강해지고 여름에 약해지는 계절 변동을 보인다(Park et al., 2004; Park and Park, 2019). 하지만 Figure 14에서 아극전선이 위치한 동해 중앙부는 1-3월에 평균반경 길이가 크 게 나타난 후 6월에 200 km 이상의 평균반경이 나타나 겨울과 여름에 각각 공간 규모가 증가하는 계절 변동성이 나타난다.

평균반경 길이의 계절 변동성은 쿠로시오 해류가 통과하는 해역에서 도 뚜렷하게 나타난다. 3-4월에 약 200 km 이상의 평균반경 길이가 나 타나며 최댓값을 나타내고 9-10월에 80 km 이하의 최솟값을 보여준다. 쿠로시오 해류는 겨울에 해류의 운동에너지가 증가하고 여름에 감소하는 양상을 보인다(Wang et al., 2022). 따라서 겨울에 증가한 해류의 운동에 너지가 3-4월의 큰 평균반경 길이를 형성하고 여름에 감소하는 해류의 운동에너지가 9-10월의 최소 평균반경 길이를 형성하는 계절 변동성을 유발하는 것으로 보인다.



Figure 14. Distriution of average monthly mean radius (km) in the Northwest Pacific from 1 January 2015 to 31 December 2021.

3.2.2. 장축의 기울기

Figure 15는 월별 장축의 경사각 평균 값을 월별로 도시하여 나타낸 것이다. 장축의 경사각 월별 분포에서 나타나는 계절 변동성은 평균반경 과 이심률의 분포에서 나타나는 계절 변동성 보다 약한 모습을 보인다. 이는 장축의 경사각은 공간 규모의 크기를 반영하지 못하고 해양 현상의 방향성을 반영하기 때문에 계절에 의하여 해양 현상의 세기가 변하는 계 절 변동성이 비교적 반영되지 않기 때문이다. 반면 계절에 따라 흐름의 방향 변동이 나타나는 해양 현상의 변화는 평균반경 길이와 이심률에 비 하여 장축의 기울기 분포에서 잘 나타난다.

장축의 기울기 분포에서 나타나는 계절 변동성은 주로 황해에서 나타 나는데, 황해의 장축의 경사각은 연중 대부분 약 100° 이상의 값을 보여 준다. 그러나 10월부터 2월의 기간에는 장축의 경사각이 150° 이상의 값 을 나타내며 해양 현상의 방향이 변화하는 계절 변동성이 나타난다. 황 해의 해류는 다양하고 계절 변동성이 커서 계절에 따라 황해에 흐르는 해류의 방향이 변화하는데 특히 황해 난류의 변화가 뚜렷하다. 황해 난 류는 겨울에 강해지며 황해 북서쪽을 향해 뚜렷하게 확장한다(Xu et al., 2018). 이러한 황해 난류의 계절 변동 특징에 의하여 장축의 경사각 분 포 또한 계절 변동성을 나타내는 것으로 판단된다.



Figure 15. Distriution of average monthly tilting angle (°) in the Northwest Pacific from 1 January 2015 to 31 December 2021.

3.2.3. 이심률

Figure 16은 월별 이심률의 평균 분포를 월별로 도시한 것이다. 이심 률은 해양 현상의 형태를 나타내는 것으로 이심률이 증가하는 것은 해양 현상의 영역이 찌그러진 타원의 형태를 가져 특정 방향으로 뚜렷한 흐름 을 가지는 해양 현상이 형성되고 있음을 나타낸다. 황해의 이심률은 전 반적으로 0.7 이하의 이심률을 보이고 있으나 11월, 12월, 1월의 겨울 시 기 황해 북쪽 해역의 이심률이 약 0.85 이상의 값을 나타내는 계절 변동 성을 보여준다. 이는 겨울에 황해 난류가 강화되어 영역이 확장되는 것 과 동일한 양상이며 황해 난류의 계절 변동성이 반영되어 이심률 분포에 서 계절 변동성이 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 쿠로시오 해류가 통 과하는 해역의 이심률도 겨울에 약 0.95 이상으로 증가하는 계절 변동성 이 나타난다.

표층 해류 뿐 아니라 해양 전선의 계절 변동성 또한 이심률의 계절 변동성에 반영된다. 해양 전선의 형태는 긴 띠의 형태를 취하고 있으므 로 해양 전선이 뚜렷하게 형성되는 경우 이심률이 증가하는 양상이 나타 난다. Figure 16에서 동해 중앙의 아극전선이 위치한 해역의 이심률이 12-3월의 겨울과 5-6월의 여름 시기에 이심률의 값이 크게 나타나 평균 반경 길이에서도 나타난 겨울과 여름에 각각 최댓값이 나타나는 형태의 계절 변동성을 볼 수 있다.



Figure 16. Distriution of average monthly eccentricity in the Northwest Pacific from 1 January 2015 to 31 December 2021.

3.2.4. 해역별 계절 변동

Figure 17-18는 동해와 황해의 평균반경 길이와 이심률의 anomaly를 시계열 분포로 나타낸 것이다. anomaly는 평균변경 길이와 이심률 산출 값에서 7년 연구 기간 전체 평균 수치를 뺀 값이다. 이를 통해 연구 기 간의 평균 수치에 비하여 상대적인 비교를 할 수 있다. Figure 17은 동 해의 anomaly 시계열 분포이다. 평균반경 길이 anomaly에서 음의 anomaly가 크게 나타나는 극소값 부분이 매년 한 번씩 총 7번이 나타나 고 있다. 이를 통하여 동해에는 계절 변동이 활발하게 나타나는 것을 알 수 있으며 매년 여름 음의 anomaly가 나타나는 것으로 보아 동해 해양 규모가 여름에 감소하고 겨울에 증가하는 계절 변동을 가지고 있음을 볼 수 있다. 특히 2015년 초의 경우 다른 양의 anomaly 구간에 비하여 긴 시간 동안 50 km 이상의 비교적 큰 anomaly가 유지되는 기간이 있는데, 이는 유례없는 엘니뇨 현상이 발생하였던 2015년의 기후변화 상황이 반 영된 것으로 판단된다(Figure 19). 반면 이심률의 anomaly 시계열 분포 는 역시 여름에 감소하는 음의 anomaly를 7번 보여주고 있어 계절 변동 성을 파악할 수는 있으나 평균반경 길이의 시계열에 비하여 변동성을 파 악하기 어렵다. 그러나 계절 변동성에 의해 변화하는 이심률의 폭이 양 의 이심률 0.2에서 음의 이심률 -0.5까지 도달하여 계절 변동성에 의해 0.7의 이심률이 변화하는 큰 폭의 변화를 파악할 수 있다. 이를 통해 동 해에서 나타나는 계절 변동성에 의하여 해양 현상이 나타나는 영역의 형 태는 크게 변화하는 변동성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Figure 18은 황해의 anomaly 시계열 분포이다. 황해는 평균반경 길이 와 이심률의 anomaly 모두 동해에 비하여 계절 변동성을 더욱 확실하게 파악할 수 있다. 평균반경 길이 anomaly의 경우 매년 여름 음의 anomaly가 나타나며 겨울에는 양의 anomaly이 나타나는 계절 변동성을 명확하게 보여주고 있다. 동해의 평균반경 길이의 변화 폭이 약 70 km 전후인 것을 감안할 때, 황해의 경우 양의 anomaly가 50 km 까지 도달 하고 음의 anomaly는 -40 km 까지 도달하여 약 90 km의 변동 폭을 보여주어 동해에 비해 해양 규모의 계절 변동성이 더 크다는 것을 나타 낸다. 그러나 황해 평균반경 길이 anomaly 분포는 시간에 따른 anomaly 의 분포가 전체적으로 감소하는 추세를 보여주고 있다. 양의 anomaly 극댓값은 시간이 지날수록 감소하며 음의 anomaly 극솟값은 지속적으로 증대되고 있다. 이제 황해의 해양 규모 계절 변동성은 점차 여름에 감소 하는 변동성이 큰 방향으로 변화하고 있음을 유추할 수 있다. 이심률 anomaly 시계열 분포 또한 계절 변동성이 잘 나타나지 않았던 동해에 비하여 훨씬 명확한 형태의 계절 변동성을 내포하고 있다. 황해의 이심 률 anomaly는 여름에 음의 값을 나타내는 계절 변동을 보여주고 있으며 그 폭이 0.7-0.8에 달하는 변동성을 나타내어 황해 해양 현상이 계절에 따라 매우 크게 변화하고 있음을 나타낸다.

해수면온도를 통해 산출한 해양 공간 규모의 월별 분포 및 anomaly 시계열 분포는 본 연구에서 산출한 해양 규모의 자료에서 계절 변동성이 나타나는 것을 보여주었다. 주로 평균반경 길이와 이심률의 계절 변동이 뚜렷하게 나타났으며 이러한 변동성은 황해 및 동중국해와 동해의 해양 전선, 쿠로시오 해류의 계절 변동성이 반영되었다. 이를 통해 2차원 자기 상관기법과 타원 근사를 통해 생산한 해수면온도 해양 규모는 북서태평 양 각 해역의 계절 변동성을 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있다.



FIgure 17. East Sea mean radius anomaly and eccentricity anomaly time series from 2015 to 2021.



Figure 18. Yellow Sea mean radius anomaly and eccentricity anomaly time series from 2015 to 2021.



Figure 19. Time series of El Nino and La Nino periods expressed through the MEI index.

3.3. 해양 규모의 경년 변동 특성

위성 해수면온도 자료를 통하여 산출한 해양 규모의 경년 변동성을 분석하기 위하여 EOF 분석을 시행하였다. 동해와 황해, 동중국해 세 영 역으로 나누어 분석을 시행하였으며 연구 기간인 2015년 1월 1일부터 2021년 12월 31일까지 7년간의 평균반경 길이 자료를 모두 사용하였다. EOF 분석에 사용한 평균반경 길이 자료는 모두 평균 기후장 자료를 뺀 값으로 계절 변동의 추세를 제외하였다. Figure 21-23은 각각 동해, 황 해, 동중국해의 평균반경 길이를 EOF 분석하여 도출한 1st mode의 고 유벡터의 공간적 분포와 진폭의 시계열 분포이다.

Figure 20(a)에서 동해의 고유벡터 분포는 동해 중앙부의 아극전선이 위치하는 해역(약 134°E, 37°N)에서 고유벡터의 양의 값이 가장 크게 나 타나고 있어 동해 영역의 해양 규모 경년 변동 양상은 동해 중앙 해역에 의해 주요하게 지배되는 것을 알 수 있다. 또한 Figure 20(b)의 동해의 진폭 시계열 분포를 분석해보면 전체적으로 양의 진폭이 분포하고 있으 며 음의 진폭은 -2500 보다 더 큰 진폭을 가지지 못하는 것에 비해 양 의 진폭은 7500 이상의 값 또한 가지고 있음을 볼 수 있다. 이를 통해 동해의 해양 규모 경년 변동은 감소할 때의 변동 폭에 비하여 증가하는 경우의 변동 폭이 매우 크게 나타나는 것을 파악할 수 있다. 이러한 동 해의 진폭 분포를 Figure 20(c)에서 연간 및 월간 분포로 나타내어 분석 해보았다. 평균 기후장 자료 값을 제거하였기에 계절 변동성이 제거되었 음에도 불구하고 6월과 8월 부근에 배우 큰 진폭이 나타나는 패턴이 매 년 발생하고 있다. 이는 동해의 해양 규모 변화가 단순한 계절 변동성과 다른 여름에 증가하는 경년 변동성을 가지고 있다고 볼 수 있다. 이러한 현상은 해양 전선과 해류 변동성이 표현된 현상이라고 판단할 수 있으며 실제로 Flgure 20(a)에서 파악된 동해 해양 규모 경년 변동성을 지배하 는 해역은 해양 전선과 표층 해류의 변동이 활발한 해역이다. 이 밖에도 2015년 초에, 다른 시기에서는 볼 수 없었던 겨울에 4000 이상의 진폭이 발생하는 현상이 나타난다. 이는 앞서 제시한 2015년의 유례없는 엘니뇨

- 43 -

현상에 의한 효과가 나타난 것으로 판단된다(Figure 19).

Figure 21(a)는 황해 영역의 고유벡터 분포를 나타낸 것이며 고유벡터 값이 가장 크게 나타난 지역은 쿠로시오 해류로부터 대마난류가 갈라져 나오는 해역(약 125°E, 39°N)이다. 이를 통해 황해에서 발생하는 해양 규모 경년 변동성은 해당 해역에서 나타나는 변동성에 의해 주로 지배되 어 나타난다고 확인할 수 있다. 해당 해역은 우측으로는 쿠로시오 해류 가 통과하며 좌측으로는 대만 난류가 통과하는 위치이기 때문에 다른 지 역에 비하여 해수 혼합이 매우 활발하게 일어나 변동성이 큰 해역이다. Figure 21(b)의 진폭 시계열 분포를 확인해 보아도 동해의 진폭 시계열 분포가 주로 급격하게 나타나는 양의 진폭 시기를 제외하고는 0의 진폭 부근에서 분포하는 반면 황해의 경우 양의 진폭과 음의 진폭이 매우 활 발하게 반복되어 나타나고 있으므로 그 경년 변동성이 매우 큰 것을 확 인할 수 있다. Figure 21(c)의 도표에서는 여름에 큰 진폭 패턴이 나타났 던 동해와 달리 4월과 9월 두 번에 걸쳐 큰 진폭 패턴이 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 황해의 해양 규모 변동성은 계절 변동성 이 외에도 나타나는 특이한 경년 변동성을 가지고 있다는 것을 시사한다.

이러한 경년 변동성들은 계절 변동성으로부터 독립적으로 나타나는 해양의 변동 패턴이기 때문에 계절 변동보다 크거나 작은 주기를 갖는 변동으로부터 유발되는 경우가 대부분이다. 따라서 본 경년 변동성 분석 결과는 AO(Arctic Oscillation), ENSO(El Nino-Southern Oscillation)와 같은 지구 기후 변화를 반영하는 대표적인 더 큰 주기의 기후 변화 인자 들과 함께 분석하여 해당 경년 변동을 통해 기후 변화를 이해하기 위한 후속 연구의 필요성이 있음을 시사한다.



Figure 20. (a) Spatial distribution of eigenvectors and (b) temporal variability of the amplitude from the first EOF mode using East Sea mean radius anomaly data from 2015 to 2021. and (c) month-year plot of (b).



Figure 21. (a) Spatial distribution of eigenvectors and (b) temporal variability of the amplitude from the first EOF mode using Yellow Sea mean radius anomaly data from 2015 to 2021. and (c) month-year plot of (b).

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 북서태평양의 위성 해수면온도 자료를 활용하여 해양 규모의 분포를 산출하고자 2015년 1월 1일부터 2021년 12월 31일까지 7 년간의 MURSST Level 4 해수면온도 합성장 자료를 수집하였다. 합성 장 자료에서 위도와 경도에 따른 해수면온도 공간적 경향성을 제거하고 2차원 자기상관기법을 적용해 e-folding 지점으로 타원 근사를 시행하였 다. 근사한 타원으로부터 타원의 중심 좌표, 장반경 길이, 단반경 길이, 평균반경 길이, 장축의 경사각, 이심률을 생산해 해수면온도 해양 규모 데이터베이스를 구축하였다.

생산된 평균반경 길이의 값은 기존 연구에서 제시된 중규모 소용돌이 의 공간규모 범위 내의 값이 산출되었으며 고위도로 갈수록 평균 평균반 경의 값이 증가하는 위도에 따른 공간 규모 경향성을 보여주었다. 또한 표층 해류와 해양 전선이 존재하는 해역에서의 공간 규모가 크게 나타나 중규모 소용돌이 이외의 해양 현상에 대한 특성 또한 반영되었음을 확인 할 수 있었다. 장축의 경사각의 분포에서는 해양 현상의 흐름 방향성이 반영되어 해류의 흐름 방향과 해양 전선의 형성 방향을 확인할 수 있다. 이심률의 분포에서는 해양 현상이 나타나는 형태의 특성이 반영되었다. 또한 해수면온도 자료로 생산한 해양 공간 규모의 분포는 계절 변동성을 나타내고 있으며. 동해와 황해 모두 여름에 해양의 규모가 감소하고 겨 울에 증가하는 계절 변동성 패턴을 보여주고 있다. 또한 경험직교함수를 이용한 경년 변동성의 분석 결과 동해, 황해에서 나타나는 계절 변동성 과 독립된 경년 변동성 패턴을 확인할 수 있었다.

기존의 연구에서는 해수면온도 합성장을 형성하기 위해 사용하는 내 삽 window를 일정한 크기로 설정하여 동일하게 적용하였다. 하지만 본 연구에서 생산한 타원 형태의 영역은 실제 해양 현상의 물리적 특성을 효과적으로 반영하며 계절 변동성 및 경년 변동성을 나타내고 있어 인공 위성 해수면온도 합성장 산출시 내삽 window로 사용될 경우 실제 해양

- 47 -

의 물리적 특성을 잘 반영하는 합성장을 생산할 수 있을 것이다. 또한 본 연구에서 제시한 해양 규모는 계절 변동성 및 경년 변동성을 명확하 게 보여주어 이를 다양한 기후 변화 인자와 함께 비교할 경우 기후 변화 를 예측하고 후속 연구를 진행하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- Abel, R., Boning, C. W., Greatbatch, R. J., Hewitt, H. T., and Roberts, M. J., 2017, Feedback of mesoscale ocean currents on atmospheric winds in high-resolution coupled models and implications for the forcing of ocean-only models. Ocean Science Discussions, 1–22.
- Barton, I. J., 1995, Satellite derived sea surface temperatures: Current status. Journal of Geophysical Research: Oceans, 100(C5), 8777–8790.
- Brasnett, B., 1997, A global analysis of sea surface temperature for numerical weather prediction. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 14, 925–937.
- Cao, L., Tang, R., Huang, W., and Wang, Y., 2021, Seasonal variability and dynamics of coastal sea surface temperature fronts in the East China Sea. Ocean Dynamics, 71, 237–249.
- Casey, K. S., and Cornillon, P., 2001, Global and regional sea surface temperature trends. Journal of Climate, 14(18), 3801–3818.
- Castro, S. L., Emery, W. J., and Wick, G. A, 2005, Accuracy improvement in an infrared satellite skin sea surface temperature product. In Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS'05, Vol. 4, pp. 2617–2620, IEEE.

- Cohen, L., 1998, The generalization of the Wiener-Khinchintheorem. In Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP'98 (Cat. No. 98CH36181) (Vol. 3, pp. 1577–1580). IEEE.
- Donlon, C., Robinson, I., Casey, K. S., Vazquez-Cuervo, J., Armstrong, E., Arino, O., ... and Rayner, N, 2007, The global ocean data assimilation experiment high-resolution sea surface temperature pilot project. Bulletin of the American Meteorological Society, 88(8), 1197–1214.
- Emery, W.J., S. Castro, G.A. Wick, P. Schluessel, and C. Donlon, 2001, Estimating sea surface temperature from infrared satellite and in situ temperature data, Bulletin of the American Meteorological Society, 82, 2773.
- Faghmous, J. H., Frenger, I., Yao, Y., Warmka, R., Lindell, A., and Kumar, V., 2015, A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry. Scientific data, 2(1), 1–16.
- Gentemann, C. L, 2014, Three way validation of MODIS and AMSR E sea surface temperatures. Journal of Geophysical Research: Oceans, 119(4), 2583–2598.
- Griffies, S. M., Winton, M., Anderson, W. G., Benson, R., Delworth, T. L., Dufour, C. O., ... and Zhang, R., 2015, Impacts on ocean heat from transient mesoscale eddies in a hierarchy of climate models. Journal of Climate, 28(3), 952–977.

- Guan, L., and Kawamura, H., 2004, Merging satellite infrared and microwave SSTs: Methodology and evaluation of the new SST. Journal of Oceanography, 60(5), 905–912.
- Hickox, R., Belkin, I., Cornillon, P., and Shan, Z., 2000, Climatology and seasonal variability of ocean fronts in the East China, Yellow and Bohai Seas from satellite SST data. Geophysical Research Letters, 27(18), 2945–2948.
- Hooker, S. B., and Olson, D. B., 1984, Center of mass estimation in closed vortices: A verification in principle and practice. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1(3), 247–255.
- Kamenkovich, I., Garraffo, Z., Pennel, R., and Fine, R. A., 2017, Importance of mesoscale eddies and mean circulation in ventilation of the S outhern O cean. Journal of Geophysical Research: Oceans, 122(4), 2724–2741.
- Khintchine, A., 1934, Korrelationstheorie der stationaren stochastischen Prozesse. Mathematische Annalen 109, 604–615.
- Lee, K., Nam, S., and Kim, Y. G., 2019, Statistical characteristics of east sea mesoscale eddies detected, tracked, and grouped using satellite altimeter data from 1993 to 2017. The Sea: JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY OF OCEANOGRAPHY, 24(2), 267–281.

Leibovich, N., and Barkai, E., 2015, Aging wiener-khinchin theorem.

Physical review letters, 115(8), 080602.

- Merchant, C.J., Embury, O., Roberts-Jones, J., Fiedler, E., Bulgin, C.E., Corlett, G.K., Good, S., McLaren, A., Rayner, N., Morak-Bozzo, S., et al., 2014, Sea surface temperature datasets for climate applications from Phase 1 of the European Space Agency Climate Change Initiative (SST CCI). Geoscience Data Journal, 1, 179–191.
- Nishikawa, H., Nishikawa, S., Ishizaki, H., Wakamatsu, T., and Ishikawa, Y., 2020, Detection of the Oyashio and Kuroshio fronts under the projected climate change in the 21st century. Progress in Earth and Planetary Science, 7(1), 1–12.
- Park, J. E., and Park, K. A., 2019, Comparison of mesoscale eddy detection from satellite altimeter data and ocean color data in the East Sea. The Sea Journal of the Korean Society of Oceanography, 24(2), 282–297.
- Park, K. A., Chung, J. Y., and Kim, K., 2004, Sea surface temperature fronts in the East (Japan) Sea and temporal variations. Geophysical Research Letters, 31(7).
- Park, K. A., and Kim, Y. H., 2009, A Methodology for 3–D Optimally–Interpolated Satellite Sea Surface Temperature Field and Limitation. Journal of the Korean earth science society, 30(2), 223–233.
- Park, K., Lee, J. Y., Park, J. J., Lee, E., Byun, D. S., Kang, B. S., &

Jeong, K. Y., 2020, Analysis of Integrated Oceanic Current Maps in Science and Earth Science Textbooks of Secondary School Based on 2015 Revised Curriculum. Journal of the Korean earth science society, 41(3), 248–260.

- Park, K. A., Park, J. E., Choi, B. J., Lee, S. H., Shin, H. R., Lee, S. R., ... and Lee, E., 2017, Schematic maps of ocean currents in the Yellow Sea and the East China Sea for science textbooks based on scientific knowledge from oceanic measurements. The Sea: Journal Of the Korean Society of Oceanography, 22(4), 151–171.
- Park, K. A., Woo, H. J., and Ryu, J. H., 2012, Spatial scales of mesoscale eddies from GOCI Chlorophyll-a concentration images in the East/Japan Sea. Ocean Science Journal, 47, 347-358.
- Reynolds, R. W., and Smith, T. M., 1994, Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. Journal of climate, 7(6), 929–948.
- Sakurai, T., Kurihara, Y., and Kuragano, T., 2005, Merged satellite and in-situ data global daily SST. In Proc. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).
- Sidder, A., 2022, Spatial scale shapes the ocean and atmosphere's influence on the climate, Eos, 103.

- Voosen, P., 2020, Global warming is speeding up Earth's massive ocean currents. Science, available at: https://www.sciencemag.org/news/2020/02/global-warming-spe eding-earth-s-massive-ocean-currents.
- Wang, S., Song, Z., Ma, W., Shu, Q., and Qiao, F., 2022, Mesoscale and submesoscale turbulence in the Northwest Pacific Ocean revealed by numerical simulations. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 206, 105221.
- Wentz, F.J., and Schabel, M., 2000, Precise climate monitoring using complementary satellite data sets. Nature, 403, 414–416.
- Wiener, N., 1930, Generalized harmonic analysis. Acta mathematica, 55(1), 117–258.
- Woert, M. V., 1982, The Subtropical Front: satellite observations during FRONTS 80. J. Geophys. Res., 87, 9523 9536.
- Xu, L. L., Wu, D. X., Lin, X. P., and Ma, C., 2009, The study of the Yellow Sea Warm Current and its seasonal variability. Journal of Hydrodynamics, 21(2), 159–165.
- Xu, A., Yu, F., and Nan, F., 2019, Study of subsurface eddy properties in northwestern Pacific Ocean based on an eddy-resolving OGCM. Ocean Dynamics, 69, 463–474.
- Zhang, F., Li, X., Hu, J., Sun, Z., Zhu, J., and Chen, Z., 2014, Summertime sea surface temperature and salinity fronts in the

southern Taiwan Strait. International journal of remote sensing, 35(11-12), 4452-4466.

Abstract

Spatiotemporal Variability of Oceanic Scales Using Satellite Sea Surface Temperature Data in the Northwest Pacific

Byeong-Dae Kwak Science Education (Earth Science) The Graduate School Seoul National University

Sea surface temperature is a key variable in various phenomena of the ocean-atmosphere and climate change. The distribution of sea surface temperatures provides an important clue to understanding the spatiotemporal scale of ocean phenomena. In this study, the scale of ocean phenomena was calculated through the sea surface temperature of the Northwest Pacific using satellite sea surface temperature data from January 2015 to December 2021, and spatiotemporal variability was analyzed. In order to calculate the oceanic scales, the spatial

trend tendency for latitude and longitude was removed from a specific range including each lattice, and the two-dimensional autocorrelation calculated according to the distance. function was Elliptical approximation was performed to the e-folding points of the autocorrelation function distribution to derive the major characteristic variables of the ellipse: ellipse center coordinates, semi-major axis, semi-minor axis, tilting angle, eccentricity, and mean radius. The spatial scale of the Northwest Pacific was well reflected in the mean radius distribution, the spatial scale of the mesoscale eddies and the spatial distribution tendency of the surface currents and oceanic fronts, and the distribution of the tilting angle and eccentricity reflected the flow direction and eccentricity. In addition, seasonal variability reflecting the characteristics of surface currents and oceanic fronts, and age variability in the East Sea, Yellow Sea, and were derived as a result of analyzing the empirical orthogonal function. In this study, the calculated values of ocean scale derived through elliptic approximation were able to explain the physical phenomena and variability of each sea area well and showed significant and aging variability. Subsequent seasonal studies comparing various climate change factors and spatiotemporal variability are needed, and it is expected that applying this data as an interpolation area to calculate sea surface temperature summation or use it as a numerical model input can help research and predict changes in mesoscale eddies and ocean phenomena.

keywords : satellite, sea surface temperature, ocean scale, autocorrelation, elliptical approximation, variability *Student Number* : 2021-22058