



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](#)

석사학위논문

앙상블 경험적 모드 분해법과
해양모델을 사용한 열대 태평양의
해수면 변동성에 관한 연구

제주대학교 대학원

지구해양과학과

차 상 철

2018 년 2 월

앙상블 경험적 모드 분해법과 해양모델을 사용한 열대 태평양의 해수면 변동성에 관한 연구

지도교수 문재홍

차상철

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 신청함

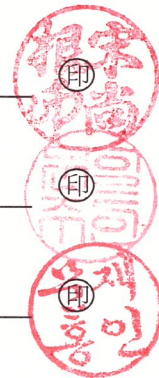
2017년 12월

차상철의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 송상근

위 원 문일주

위 원 문재홍



제주대학교 대학원

2017년 12월

A Study on the Sea Level Variability
in the Tropical Pacific Using Ensemble
Empirical Mode Decomposition and
Ocean Circulation Model

Sang-Chul Cha

(Supervised by professor Jae-Hong Moon)

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

December 2017

This thesis has been examined and approved.

.....
Thesis director, Sang-Keun Song, Prof. of Earth Marine Sciences

.....
Il-Ju Moon, Prof. of Marine Meteorology

.....
Jae-Hong Moon, Prof. of Earth Marine Sciences

Date 2017. 12

Department of Earth and Marine Sciences
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

목차	i
List of Figures	ii
List of Tables	iv
Abstract	v
1. 서론	1
2. 자료 및 방법	5
2.1 자료	5
2.2 연구방법 - 앙상블 경험적 모드 분해법(EEMD)	6
2.3 해양모델	10
3. 결과	12
3.1 열대태평양에서 지역별 해수면 변화	12
3.2 해수면변동과 기후변동과 관련된 바람과 관계	21
3.3 모델로 재현된 장주기 해수면 변동	29
4. 결론	37
5. 요약	40
참고문헌	41
감사의 글	

List of Figure

Fig. 1. Sea level trends from (a) 1993 to 2010 (b) 1993 to 2015 (c) and 2011 to 2015 based on satellite altimeter measurement data.	4
Fig. 2. Example of EMD process. (a) Original time series (blue line). Local maximum (red dot) and minimum (yellow dot). Upper envelope (red line) and lower envelope (yellow line). (b) Black line is mean time series of upper envelope and lower envelope. (c) Blue line is a time series that removed the black line(b) from original time series(a). (d) The first intrinsic mode function of time series.	8
Fig. 3. Algorithm of EEMD (obtained from Park and Choi, 2017).	9
Fig. 4. Model domain and bathymetry (in meter).	11
Fig. 5. Study regions; the western (R1), eastern (R3) and central (R2) regions of tropical Pacific region.	15
Fig. 6. Averaged sea level variability for (a) R1 (b) R2 and (c) R3. The linear trends were also plotted in each region for the period of 1993 to 2015 (black), 1993 to 2010 (yellow), and 2011 to 2015 (red dashed lines).	15
Fig. 7. The intrinsic mode functions and residue of sea level variability of R1.	16
Fig. 8. The intrinsic mode functions and residue of sea level variability of R2.	17
Fig. 9. The intrinsic mode functions and residue of sea level variability of R3.	18
Fig. 10. Power spectra for each IMF of the sea surface height for (a) R1, (b) R2, (c) R3.	19
Fig. 11. The significance of each IMF of the sea surface height for (a) R1, (b) R2, and (c) R3. The significance was determined by calculating 95% and 99% confidence levels of spread function of white noise.	20
Fig. 12. The intrinsic mode functions and residue of MEI.	24
Fig. 13. (a) Significance test of each IMF of the MEI. (b) Power spectra for each IMF of the MEI.	25

Fig. 14. The trade wind region where the east-west component of wind stress was spatially averaged.	26
Fig. 15. The intrinsic mode functions and residue of trade wind.	26
Fig. 16. (a) Significance test of each IMF of the trade wind. (b) Power spectra for each IMF of the trade wind.	27
Fig. 17. Low-frequency variability (IMF5+IMF6) for R1, R2, R3, MEI, and Trade wind. Each variability is normalized by their standard deviations.	28
Fig. 18. (a) Regressed wind and sea level patterns onto the (b) low-frequency (IMF5+IMF6) of the MEI from 1993 to 2015.	28
Fig. 19. Comparison between satellite altimetry (blue) and modeled (red) sea level variability for (a) R1, (b) R2, and (c) R3. Correlations of satellite altimetry and modeled sea level are 0.94(a), 0.85(b) and 0.91(c) in each region.	32
Fig. 20. Sea level trend from (a) 1993 to 2010 and (b) 2011 to 2015, based on modeled sea level variability.	33
Fig. 21. (a) Mean wind pattern of each grid. (b) Regressed wind patterns onto the (c) low-frequency (IMF5+IMF6) of the MEI from 1993 to 2015.	34
Fig. 22. Comparison between low-frequency sea level variability based on satellite altimetry (blue line) and modeled sea level variability forced by wind related to low-frequency of MEI for (a) R1, (b) R2, and (c) R3.	35
Fig. 23. Sea level trend from (a) 1993 to 2010 and (b) 2011 to 2015, based on modeled sea level variability which forced by wind related to low-frequency of MEI.	36

LIST OF TABLES

Table 1. Correlation with low-frequency of MEI and low-frequency of R1, R2, R3, and trade wind.	27
---	----

Abstract

Since the early 1990s, sea level trends in the western tropical Pacific (WTP) have risen rapidly and trends in the eastern tropical Pacific (ETP) has fallen slowly or been near zero. However, the sea levels were flipped into a downward trend in the WTP and an upward trend in the ETP over the recent few years. In order to identify whether this sea level shift is a short-term variability or a part of long-term change, this study analyzed both satellite altimeter data since 1993 and result from a global ocean circulation model using ensemble empirical mode decomposition (EEMD) method that decomposes the sea level fields into ones with different time scales. Our analysis show that high-frequency components on the time scale of 1.5-4 years are characterized as the inter-annual El-Nino Southern Oscillation (ENSO) variability, whereas low-frequency components on the time scale of 7-20 years are closely associated with the recent sea level shift in the tropical Pacific. The low-frequency sea level modes indicate a close connection with the ENSO-related low-frequency wind variability. The dynamical ocean response is demonstrated by conducting additional experiment with the ENSO-related low-frequency surface wind forcing, which confirms that the climate-related wind has played a crucial role in suppressing the sea level rise (SLR) in the WTP, while strengthening the SLR in the ETP over the recent few years.

1. 서론

1992년 10월 위성고도계가 탑재된 TOPEX/Poseidon이 발사된 이후로 거의 전 지구적인 해수면 관측이 가능하게 되었고, 후속위성인 Jason-1/2/3와 ERS-1/2, Envisat, Geosat등의 해양위성의 등장은 전 지구적인 해수면 변화와 지역적인 해수면 변화를 연구하는데 상당한 기여를 하고 있다. 전 지구 평균 해수면은 위성 관측 이래로 지속적으로 상승해왔는데, 기존 연구들에 의하면 1993년부터 2010년까지 전 지구 평균 해수면 상승률을 약 $3.2 \pm 0.4 \text{ mm/yr}$ 로 보고했다(Ablain et al., 2009; Beckley et al., 2010; Leuliette and Scharroo, 2010; Nerem et al., 2010; Church and White, 2011; Masters et al., 2012). 하지만 전 지구 평균 해수면 상승률은 지역적으로 동일하게 나타나지 않고 커다란 편차를 보인다. 해수면 상승률의 지역적인 편차는 특히 열대 태평양에서 뚜렷하게 나타난다. Church et al (2010)은 위성자료를 사용하여 1993년부터 2009년까지 태평양에서의 해수면 상승을 분석한 결과 열대 서태평양에서 전 지구 평균 해수면 상승률보다 수 배나 빠른 상승률을 보인 반면에 동태평양에서는 감소하거나 정체되는 상승률을 나타냈다. 장기간의 조위 관측자료를 사용한 연구에서도 90년대 초 이후 열대 서태평양에서 해수면이 빠르게 상승하고 미국 서부 연안을 포함한 동태평양에서 감소하거나 정체되는 상승률이 보고됐는데(Merrifield, 2011) 이는 위성 기간에 나타난 해수면 상승패턴과 일치한다.

해수면 상승률의 지역적인 차이는 대규모 해양-대기순환과 관련된 기후 변동성에 영향을 받는다고 알려져 있으며(Zhang and Church, 2012, Moon et al., 2013, 2015) 태평양에서는 El Nino Southern Oscillation (ENSO)가 대표적이다. ENSO는 열대 태평양에서 경년 변동성을 대표하는 기후 변동성으로 열대 태평양의 대규모 바람 패턴과 밀접한 관련성을 보인다. ENSO가 warm phase일 때는 엘니뇨를 의미하며 무역풍의 세기가 약해지고 cold phase일 때는 라니냐로 엘니뇨와 반대로 무역풍의 세기가 강해지는 패턴이 나타난다. 이러한 무역풍의 변화는 열대 태평양 해수면 변동성에 직접적인 영향을 주게 되는데 Wyrski (1975)는 ENSO 변동

성과 관련된 무역풍의 변화가 열대 태평양에서 동서 방향 해수면 경사를 만든다고 보고했다. 다양한 주기의 변동성을 포함하는 ENSO 시그널은 열대 태평양해역의 경년 변동(3~5년)을 지배하는 것으로 알려져 있지만, 내재된 장주기 변동성 또한 열대 태평양의 해양-기후변화에 중요한 요인이 된다. Qiu and Chen (2010)은 수치 모델을 사용한 연구에서 ENSO의 장주기 변동성과 관련된 바람 패턴이 열대 태평양의 장주기 해수면 변화와 연관성이 있음을 보였다. 또한, 다변량 회귀 분석을 사용하여 ENSO의 단주기와 장주기 변동성에 대한 해수면 변동을 분리한 Zhang and Church (2012)는 위성관측 기간동안 열대 서태평양에서 높고 동태평양에서 정체되거나 감소하는 해수면 패턴이 ENSO의 장주기 변동성에 의한 해수면 변동임을 제시했다.

최근 Hamlington et al (2016, 이후부터는 H2016)은 cyclostationary empirical orthogonal function (CSEOF)를 사용한 위성 해수면 분석결과로부터 최근 몇 년 동안 기존의 열대 서태평양에서 상승하고 동태평양에서 정체되거나 하강하는 해수면 패턴과는 반대로 열대 서태평양에서 하강하고 동태평양에서 상승하는 패턴을 보고했다. 최근의 급격한 해수면 변화는 Fig. 1에서 보다 분명하게 확인된다. Fig. 1은 위성자료를 사용하여 1993년에서 2015년(Fig. 1a), 1993년에서 2010년(Fig. 1b)까지의 해수면 상승패턴과 최근 5년 동안의 상승패턴(Fig. 1c)을 나타낸 그림이다. Fig. 1a,b는 모두 열대 서태평양에서 높고 동태평양에서 낮은 상승패턴을 나타냈지만, 1993년에서 2015년까지의 상승패턴(Fig. 1b)은 1993년에서 2010년까지(Fig. 1a)에 비해 많이 약화된 모습을 보인다. 그 이유는 Fig. 1c에 나타낸 것처럼 최근 5년 동안 열대 서태평양에서 해수면이 급격하게 하강하고 동태평양에서는 상승하는 기존의 장기간 패턴과는 반대되는 변화가 나타났기 때문이다. H2016은 최근 나타난 기존과 반대되는 해수면 패턴이 ENSO와 PDO와 관련된 십년 주기(decadal)의 해수면 변동성과 연관성이 있음을 제시하였다. 기후변동성과 관련된 자연 변동성은 경년에서 수십 년에 이르는 다양한 시간 규모의 변동성이 내재되어 있는데 지역적인 해수면 상승으로부터 자연 변동성을 명확하게 분리하는 것은 지역 해수면 변화를 예측하고 해수면 상승에 의한 연안 피해를 방지하는 데 있어 매우 중요하다. 그럼에도 불구하고 자연현상은 비선형(non-linear)과 비정상성(non-stationary)을 포함하고 있기 때문에 시계열 자료로부터 내재된 고유

주기의 변동성을 정확하게 분해하는 것은 여전히 도전적인 과제이다.

파형요소(wavelet) 분석방법이나 스펙트럼 분석과 같은 기존의 시계열 자료 분석방법은 선형이나 정상성(stationary)을 가정하기 때문에 비선형과 비정상성을 갖는 자연현상으로부터 특정 주기의 변동성을 추출하는 데에 적합하지 않다. 또한, H2016에서 사용한 CSEOF나 empirical orthogonal function (EOF)와 같은 분석방법은 시공간 자료로부터 직교 함수를 검출하는 방법으로 일정한 공간구조의 시간 및 공간적인 변화를 동시에 볼 수 있는 장점이 있지만, 주성분 시계열이 다양한 시간 규모의 변동성을 포함하기 때문에 자료로부터 특정 주기의 변동성을 추출하기 어렵다. 최근 들어, 신호 분해 방법 중 하나인 앙상블 경험적 모드 분해법(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD, Wu and Huang, 2009)은 기존의 통계분석과는 달리 고정된 기저함수(basis function)를 사용하지 않고 완전히 자료의 시간 규모에 대한 국지적인 특성에 기반하여 신호를 분해하는 방법으로 원자료의 고유한 비선형과 비정상성의 특성을 그대로 보존할 수 있는 장점이 있어 다양한 분야에서 사용되고 있다(Lee et al., 2012; Kidwell et al., 2014; Kim and Cho., 2016; 박성호 등, 2017; 김한빈 등, 2017). Kidwell et al (2014)은 자료가 비정상일 경우에도 사용할 수 있는 자료 적응적인 방법인 EEMD 사용하여 열대 태평양의 SST warm pool 변동성으로부터 엘니뇨의 단주기 변동성과 관련된 EP 엘니뇨와 장주기 변동성과 관련된 CP 엘니뇨를 성공적으로 분리하였다. 본 연구에서는 이와 같은 장점이 있는 EEMD를 사용하여 열대 태평양에서 최근 몇 년 동안 나타난 급격한 해수면 변화가 단주기 기후 변동성과 관련된 일시적인 변화인지 아니면 장주기 기후 변동성과 관련된 장기적인 변화인지를 파악하고 ENSO와의 연관성을 분석했다. 또한, 기후 변동성과 관련된 바람 패턴이 해수면 변화에 어떤 영향을 주는지 확인하기 위해 전 지구 해양모델을 사용하여 기후 변동성과 관련된 바람에 대한 해수면의 역학적 반응을 실험하였다.

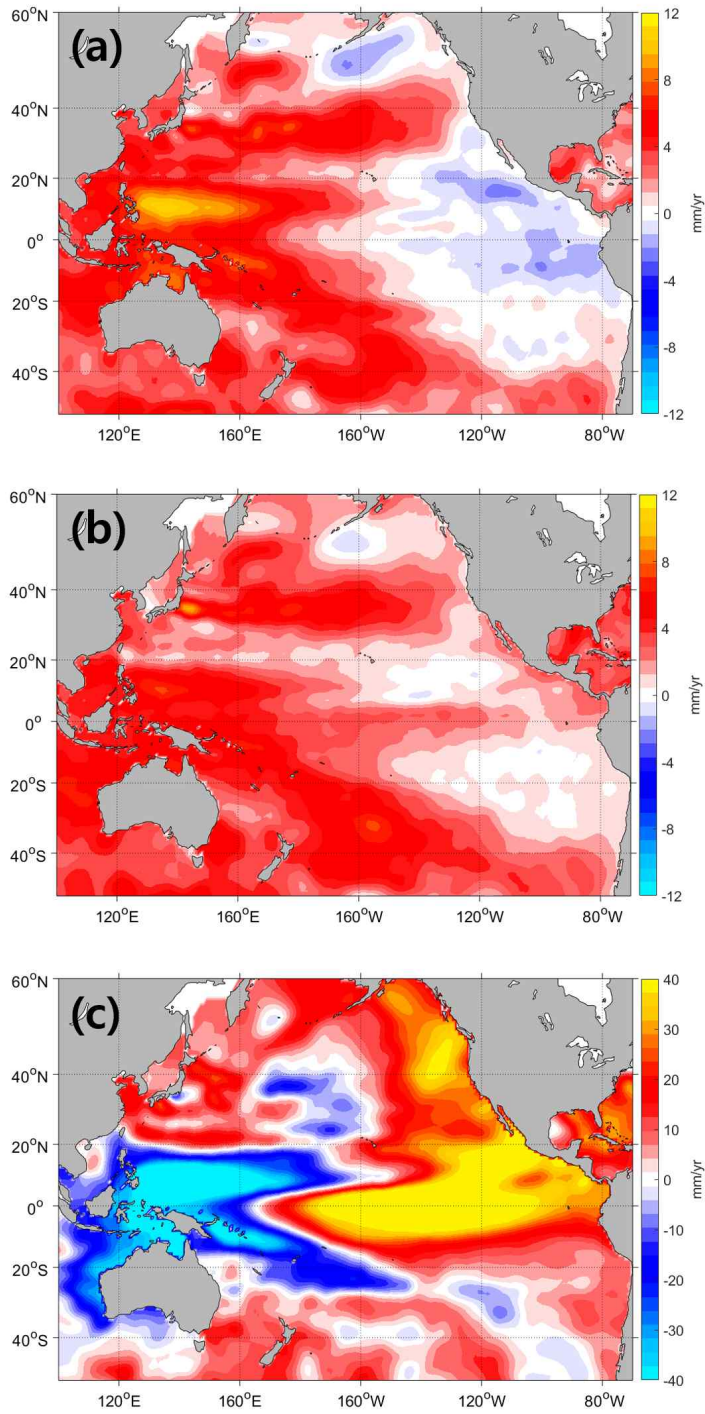


Fig. 1. Sea level trends from (a) 1993 to 2010 (b) 1993 to 2015 (c) and 2011 to 2015 based on satellite altimeter measurement data.

2. 자료 및 방법

2.1 자료

태평양의 해수면 변동성과 기후 변동성과의 관계를 알아보기 위해 본 연구에서는 위성고도계 해수면 자료, Multivariate ENSO Index (MEI) 지수 및 바람장 자료를 사용하였다. 위성고도계 해수면 자료는 호주의 연방과학산업연구기구 (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, CSIRO)에서 제공하는 해수면 고도자료이다. 이 자료는 TOPEX/Poseidon(1992-2005), Jason-1(2001-2013), 그리고 Jason-2/OSTM(2008-현재) 위성고도계 자료를 통합한 자료로써 위도 남위 65°에서 북위 65°N 범위에 걸쳐 거의 전 지구를 포함하는 자료이다. 해수면 자료의 수평 해상도는 1° × 1° 간격의 격자로 재구성되었고 1993년부터 2015년까지 23년의 기간에 대하여 월평균 자료를 사용했다 (http://www.cmar.csiro.au/sealevel/sl_data_cmar.html).

열대 태평양의 해양과 대기 패턴의 주기적인 변화를 대표하는 ENSO 시그널과 해수면 변동성과의 연관성은 MEI지수를 사용하여 분석하였다. MEI지수는 단일 변수로 정의되는 Southern Oscillation Index (SOI)와 Nino지수와는 다르게 열대 태평양해역에서 관측된 6개의 주요 해양-기상 변수인 해면 기압, 표층 바람의 동-서 성분, 기온, 표층 수온, 운량 비율을 통해서 정의되며 ENSO 현상을 분석하는데 많이 사용되는 지수중의 하나이다. 여기서는 미국해양대기청 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 국제종합해양기상자료 (International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set, ICOADS)의 해양-기상자료를 사용하여 제공하는 MEI지수를 사용하였다 (<http://www.erl.noaa.gov/psd/enso/mei/>). 또한, 기후 변동성과 관련된 바람 패턴을 확인하기 위해 미국국립환경예측센터/기상연구센터(the National Centers for Environmental Prediction/the National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR) 에서 제공하는 2.5° × 2.5° 의 수평 해상도를 가지는 월별 재분석 바람 자료를 사용하였으며 (<https://www.erl.noaa.gov/psd/data>)

/gridded/data.ncep.reanalysis.html), 자료의 기간은 위성 해수면 자료와 같은 1993년에서 2015년 자료를 사용하였다.

2.2 연구방법 - 앙상블 경험적 모드 분해법(EEMD)

열대 태평양의 지역별 해수면 자료와 ENSO 시그널에 내재된 주기별 변동성을 추출하기 위해 본 연구에서는 앙상블 경험적 모드 분해법(EEMD)을 적용하였다. EEMD는 Huang et al. (1998)에 의해 개발된 신호 분해 알고리즘인 경험적 모드 분해법(Empirical mode decomposition, EMD)에 기반한 방법으로 다양한 주기를 포함하는 복잡한 시계열 자료를 유한한 수의 내재적 모드 함수(intrinsic mode function, IMF)와 경향성을 나타내는 잔차(residue)로 분해하는 방법이다. EMD를 통해 분해된 내재 모드 함수는 극대점의 수와 영점교차(zero crossing)의 수는 같거나 최소 1이어야 하고, 국지 최댓값과 국지 최솟값에 의해 정의된 상위 막과 하위 막의 평균은 0이어야 한다는 두 가지 조건을 만족해야 하며, EMD의 모드 분해과정은 다음과 같다 (Fig. 2).

- (1) 분해하고자 하는 시계열 자료 $x(t)$ 의 국지 극댓값과 국지 극솟값을 식별한 후 극댓값과 극솟값에 대해 각각 삼차 스플라인보간법(cubic spline interpolation)으로 상위 막(upper envelope)과 하위 막(lower envelope)을 생성한다(Fig. 2a).
- (2) 상위 막과 하위 막의 평균 막(mean envelope)을 구하여 원래 시계열 자료에서 평균 막(Fig. 2b, black line)을 공제한다.
- (3) 평균 막을 공제한 후의 시계열 자료가 내재 모드 함수의 조건을 만족할 경우 이를 내재 모드 함수 IMF1로 정의한다(Fig. 2d).
- (4) (3)에서 추출된 IMF를 원자료에서 제거한 후, 즉, $x(t) - IMF_1(t) = r(t)$, $r(t)$ 를 원자료 계열로 재설정하여 $r(t)$ 가 더 이상 새로운 계열로 추출되지 않을 때까지 1-3 과정을 반복한다.

(5) 최종적으로 시계열 자료 $x(t)$ 는 아래의 Eq. 1과 같이 분해된 IMF와 경향성(trend)을 나타내는 잔차(residue)의 합으로 표현된다.

$$x(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i(t) + r(t) \quad (1)$$

여기서 N 은 추출된 IMF의 개수이다. 그러나 EMD는 서로 다른 모드 내에 유사한 진동이 나타나는 모드 혼합(mode mixing)이라는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Wu and Huang (2009)은 원래 자료에 백색 잡음(white noise)을 추가하여 이를 EMD 수행하여 나온 결과들을 앙상블 평균하는 EEMD를 제안하였다. 본 연구에서 적용한 EEMD 알고리즘을 Fig. 3에 나타냈다. 여기서 m 은 앙상블 횟수이고 EEMD 분해결과 i 번째 IMF모드(C_i)는 m 개의 EMD 결과들 ($c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,m}$)의 평균을 의미하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m c_{i,j} \quad (i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

EEMD를 사용하기 위해서는 백색 잡음의 진폭과 앙상블 횟수를 결정하게 되는데, 백색 잡음의 진폭이 너무 작을 경우 오차가 적을 수는 있지만, 모드 혼합문제를 완전히 해결하지 못할 가능성이 있으며, 백색 잡음의 진폭이 너무 클 경우는 모드 혼합문제를 해결할 수는 있지만, 오차가 커질 가능성이 있다. 따라서 효과적인 EEMD를 사용하기 위해서 백색 잡음의 진폭을 너무 작거나 큰 값으로 사용하여서는 안 되며 일반적으로 백색 잡음의 진폭은 표준편차의 0.2배, 앙상블 횟수는 수백 번 정도가 적합하다(Lei et al., 2009).

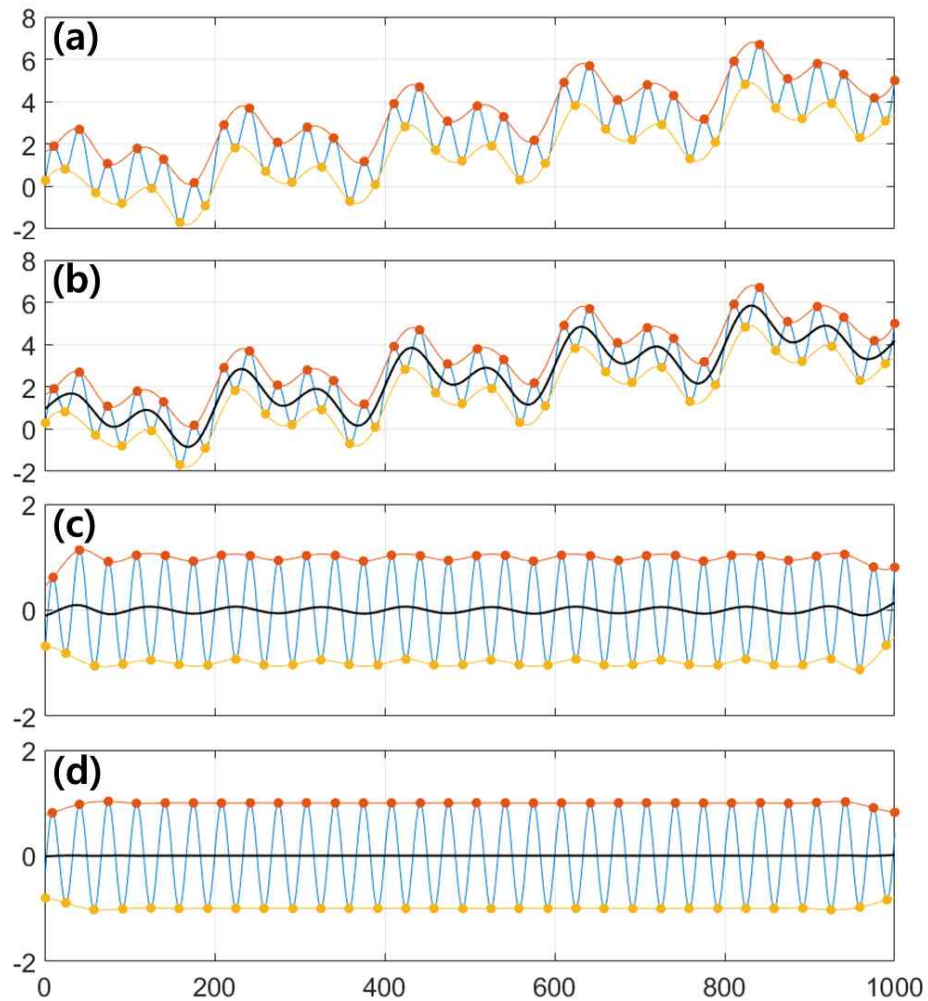


Fig. 2. Example of EMD process. (a) Original time series (blue line). Local maximum (red dot) and minimum (yellow dot). Upper envelope (red line) and lower envelope (yellow line). (b) Black line is mean time series of upper envelope and lower envelope. (c) Blue line is a time series that removed the black line(b) from original time series(a). (d) The first intrinsic mode function of time series.

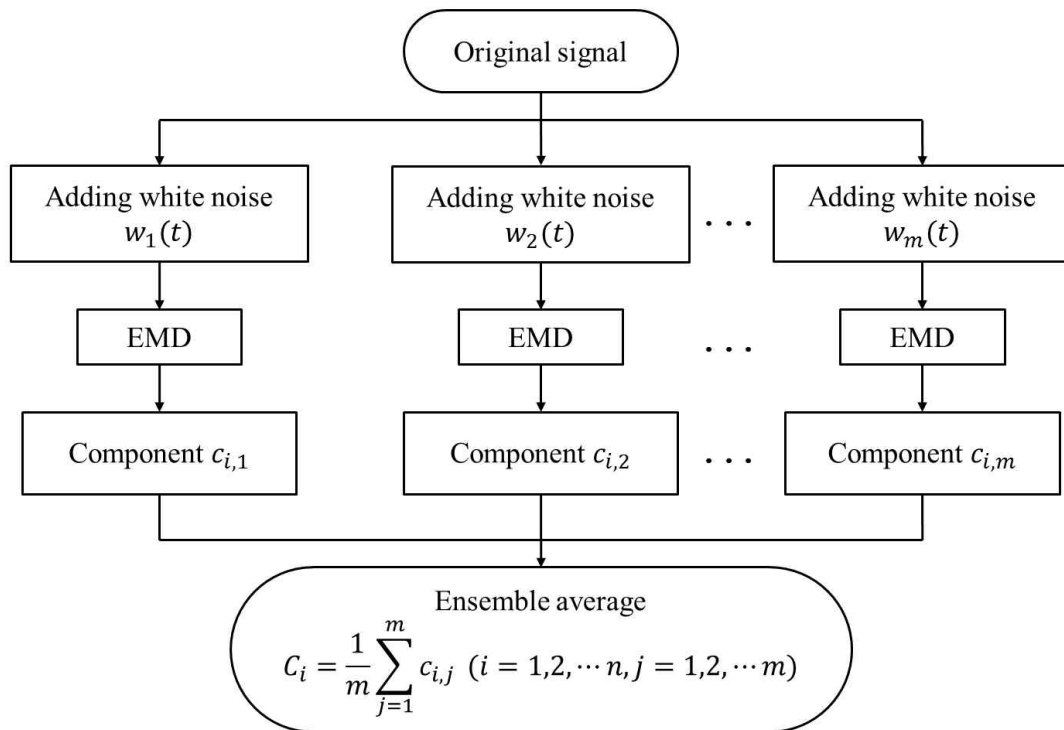


Fig. 3. Algorithm of EEMD (obtained from Park and Choi, 2017).

2.3 해양모델

Zhang and Church, (2012)는 회귀분석을 사용하여 기후 변동성과 해수면의 연관성을 파악했지만, 회귀분석과 같은 통계적인 방법은 기후변동성과 해양의 역학적인 반응을 설명하기에는 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 기후변동성과 해수면 변화의 역학적인 반응을 확인하기 위해 기후 변동성과 관련된 바람 패턴을 해양순환모델에 적용하여 해수면 변화를 확인하였다. 연구에 사용된 모델은 Regional Ocean Modeling System (ROMS) 해양모델로 나비아-스토크스 (Navier-Stokes) 방정식에 정역학 평형과 부시네스크 (Boussinesq) 근사가 적용된 원시 방정식 (Primitive)을 사용한다. 수평 격자는 각 격자 좌우에서 u , 상하에서 v , 중심에서 밀도, 수심, 수온, 염분을 계산하는 Arakawa C격자 체계를 사용함으로써 모델의 안정성을 높였다(Arakawa and Lamb, 1977). 수직 격자는 S-coordinate (stretched terrain-following coordinate)를 사용하여 바닥경계, 표층, 수온약층 등 특정 수심의 해상도를 높일 수 있어 지형에 민감하게 반응하는 압력 경도 향의 계산오차를 줄이도록 개발되었다(Song and Wright, 1998, Shechetkin and McWilliams, 2005). 또한, 생지화학, 퇴적물, 생체광학, 해빙 응용을 위한 접합모델을 포함하고 있어 해양과학의 다양한 분야에서 사용되고 있다(Haidvogel et al., 2000; Marchesiello et al., 2003; Di Lorenzo, 2003; Wilkin et al., 2005).

본 연구를 위해 구성된 모델은 수평적으로 $1^\circ \times 1^\circ$ 해상도를 가지고 수직적으로 30개의 층(layer)을 갖는 전 지구 해양모델이다. Fig. 4는 연구에 적용된 전 지구 해양모델의 도메인과 수심분포를 나타낸다. 수직혼합은 대양환경에 적합한 LMD (K-profile parameterization, The Large, McWilliams and Doney parameterization, Large et al., 1994) 모수화기법을 적용하였으며 대기-해양 경계층의 상호작용을 모수화 하기 위해 bulk formula (Fairall et al., 1996)를 사용하였다. 모델은 WOA2001의 기후적인 수온과 염분값을 사용하여 초기화했으며, NCEP/NCAR의 장기간 평균 기후장을 표면경계 외력으로 60년간 안정화(spin-up)를 거쳤다. 60년간의 안정화 이후 NCEP/NCAR의 월별 재분석 기상자료를 사용하여 1948년 1월부터 2015년 12월까지 모델 적분을 수행하였다.

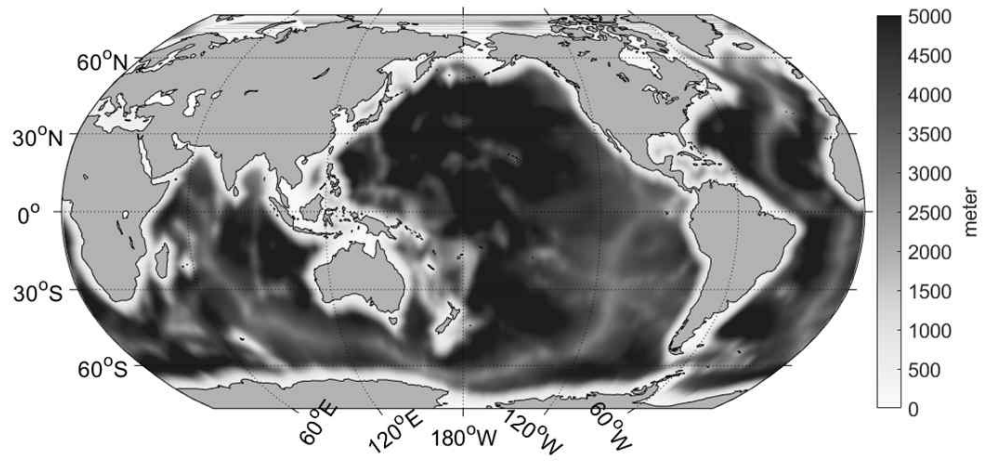


Fig. 4. Model domain and bathymetry (in meter).

3. 결과

3.1 열대 태평양에서 지역별 해수면 변화

최근에 나타난 기존의 해수면 상승과 반대되는 패턴이 언제부터 발생했는지 확인하기 위해 열대 태평양해역의 지역별 해수면 변화를 분석하였다. 분석지역은 열대 서태평양(R1)과 열대 태평양 중앙부(R2) 그리고 열대 동태평양(R3) 세 지역 (Fig. 5)을 선정하였으며, 1993년부터 2015년까지 위성고도계 자료로부터 얻어진 각 지역의 평균 해수면 변화를 Fig. 6에 제시하였다. 열대 태평양 세 지역 해수면 변화는 계절 변화와 경년 변동성이 뚜렷하게 나타나는데 R1 지역은 R2와 R3 지역의 해수면 변화와 반대 변동성을 보인다. 엘니뇨 시기에 R1지역 해수면은 하강하고 R2와 R3 지역에서 해수면이 상승하는데 특히, 1997/1998 엘니뇨 시기에는 R1과 R3 지역에서 20cm 이상의 강한 해수면 변화가 나타났다. 열대 태평양 해수면의 경년 변동성은 동서 방향에서 뚜렷하게 나타나며 이는 ENSO의 경년 변동성과 관련된 해수면 변화와 일치한다(Landerer et al., 2008, Zhang and Church., 2012). 1993년부터 2015년까지 R1 지역의 해수면 상승은 5.16mm/yr, R2와 R3 지역은 각각 2.08mm/yr와 1.2mm/yr의 상승률로 세 지역 모두 지난 23년간 꾸준히 상승하는 경향성이 나타나지만, 열대 서태평양에서 빠르고 동태평양에서 상대적으로 느린 해수면 상승률의 지역적인 편차를 보인다. 특히, 2011년을 전후로 열대 서태평양과 동태평양에서 기존의 해수면 상승패턴과는 반대되는 패턴이 나타났다. 예를 들어, 1993년부터 2010년까지 R1 지역은 꾸준히 상승하고 R2와 R3 지역은 거의 정체되거나 감소하는 해수면 경향성을 보인 반면 2011년 이후부터 R1 지역은 급격하게 감소하고 R2와 R3 지역은 반대로 급격히 상승하는 경향성이 나타났다. 해수면 변화는 지구온난화에 의한 인위적인 상승과 기후변동과 관련된 자연 변동성을 함께 포함하고 있으나 지역적인 해수면 변화의 차이는 주로 자연 변동성에 의한 해양의 반응으로 나타난다고 알려져 있다(Zhang and Church, 2012).

최근 나타나고 있는 급격한 해수면 변화가 단주기 변동성과 관련된 일시적인 변화인지 장주기 변동성과 관련된 변화인지 파악하기 위해 EEMD를 사용하여 각 지역에서의 평균 해수면 변화를 분석하였다. EEMD 분석결과는 해수면 자료에 내재된 변동성이 단주기 모드 IMF1에서 장주기 모드 IMF7 순으로 총 7개의 분해 모드와 최종적으로 장기 경향성을 나타내는 잔차로 추출되었음을 보여준다 (Fig. 7-9). Eq. (1)에 나타난 것처럼 분해된 이들 모드들의 합으로 원래 해수면 변화가 정확히 복원될 수 있다. 전체적으로 IMF1-2는 계절 내 진동(intra-seasonal)과 계절변동(seasonal) 같은 짧은 주기의 변동을 나타내고, IMF3-4는 경년 변동성들이, IMF5-7은 십 년 변동과 그보다 긴 주기의 변동성, 그리고 최종적으로 비선형의 장주기 상승 경향성으로 분해된 것으로 보인다. 분해된 모드함수들이 주기별로 어떤 특징을 가지고 있는지를 알아보기 위해 스펙트럼 분석을 통해 모드별 에너지밀도를 Fig. 10에 제시하였다. 그림에서 x축은 진동수를 나타내고 y축은 에너지밀도를 나타낸다. 세 지역 모두에서 IMF1은 ~0.5년 주기에서 최대에너지를 보이고, IMF2는 연간 변동성으로 1년 주기에서 강한 에너지 피크를 보인다. IMF3은 1.5에서 2.5년 IMF4는 ~4년의 주기에서 최대에너지 피크를 보이면서 열대 태평양 해수면의 경년 변동성을 나타낸다. 예를 들어, IMF3과 IMF4에서 엘니뇨 시기에 R1 지역에서 해수면이 하강하는 반면 R2와 R3 지역에서 해수면이 상승하는 모습을 보이는데 이는 열대 태평양에서 ENSO 변동성과 관련된 해수면 변동성이 제대로 추출되었음을 의미한다. IMF5는 7년에서 12년 사이에서, IMF6은 12년에서 20년 사이에 최대에너지 주기를 보이며 IMF7은 20년에서 최대에너지 주기를 나타낸다. 장주기 변동성들은 최근 몇 년간 R1 지역에서는 급격하게 하강하는 반면 R2와 R3 지역에서 반대로 상승하는 패턴을 보이는데, 이러한 장주기 패턴의 변화는 최근 관측된 열대 동-서태평양의 급격한 해수면 변화와 일치한다. 주목할만한 점은 IMF5와 IMF6과 비교해 IMF7은 상대적으로 작은 크기를 보인다는 것이다. R1과 R2 지역의 경우 IMF7의 크기가 IMF5와 IMF6의 약 1/10 수준에 지나지 않으며, R3 지역도 1/2 수준으로 IMF5와 IMF6 변동성이 최근 해수면 변화에 크게 기여했을 것으로 생각된다. 마지막으로 잔차는 비선형의 장주기 경향성을 나타내는데 R1과 R3 지역에서 2000년대 중반과 초반을 전후로 상승 패턴이 바뀌는 모습을 보이지만, 모든 지역에서 상승하는 패턴을 나타낸다.

각각의 내재 모드들은 서로 다른 변동특징을 보이기 때문에 분해된 변동성이 백색 잡음(white-noise)과 구별되는 유의미한 변동성인지 아닌지를 확인할 필요가 있다. Wu and Huang (2004)은 분해된 IMF가 통계적으로 유의미한지를 판단하기 위해 사용된 백색 잡음에 대한 확산함수(spread function)의 확산한계(spread line)를 사용하여 유의성 검정을 수행하였다. EEMD를 통해 분해된 각 IMF의 에너지 밀도가 임의의 유의수준(e.g., 99%)에 상응하는 백색 잡음 확산함수의 확산한계 내에 (아래에) 있으면 그것은 백색 잡음과 구별하기 힘들며, 원래 자료의 변동성에 영향을 미치지 않는다고 판단할 수 있고 확산한계 밖에 위치하면 그 IMF는 유의수준(e.g., 99%) 이상의 확률로 백색 잡음과 구별되는 유의미한 변동성이라고 판단할 수 있다. Fig. 11은 세 지역에 대한 IMF들의 유의성 검정결과를 나타낸 그림으로 평균 주기와 에너지밀도에 대해서 95%와 99% 유의수준에 해당하는 신뢰구간을 점선과 실선으로 각각 나타냈다. 모든 지역에서 IMF1-6의 에너지밀도는 95% 신뢰구간 밖에 위치하고 그 중 IMF2-6은 99% 신뢰구간 밖에 위치함으로써 분해된 내재 모드 함수들은 통계적으로 백색 잡음과 구별되는 유의미한 변동성을 나타낸다. 그러나 IMF7의 에너지밀도는 IMF1-6에 비해 작은 에너지밀도를 보인다. R1과 R3 지역에서는 95% 신뢰구간 밖에 위치하여 유의미한 변동성을 나타내지만, R2 지역은 에너지가 신뢰구간 범위 아래 위치해 백색 잡음이라고 판단할 수 있어 유의미한 변동성으로 보기 어렵다. 이러한 결과는 EEMD로 분해된 IMF7의 변동성이 다른 IMF와 비교해서 상대적으로 작게 추출된 것과 일치하는 결과이다. 즉, IMF7은 IMF5와 IMF6에 비하여 작은 진폭을 가질 뿐만 아니라 R2 지역의 경우 백색 잡음과 구별하기 힘들다. 따라서 최근 열대 태평양에서 관측된 해수면의 급격한 변화는 주로 장주기 변동 중에서 7-20년의 주기를 가지는 IMF5와 IMF6의 변동성과 밀접한 관련이 있다.

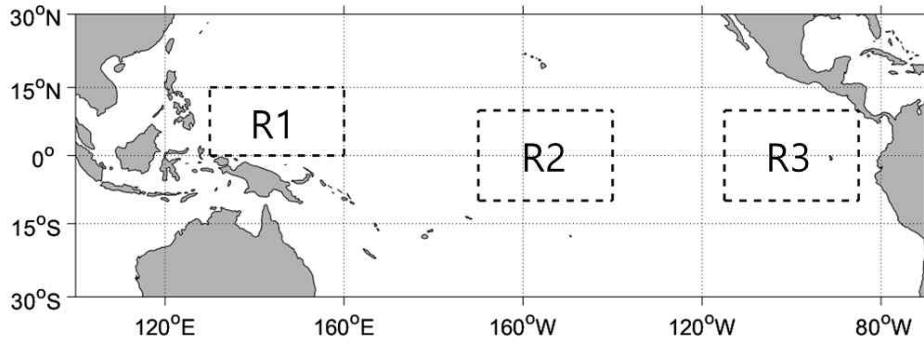


Fig. 5. Study regions; the western (R1), eastern (R3) and central (R2) regions of tropical Pacific region.

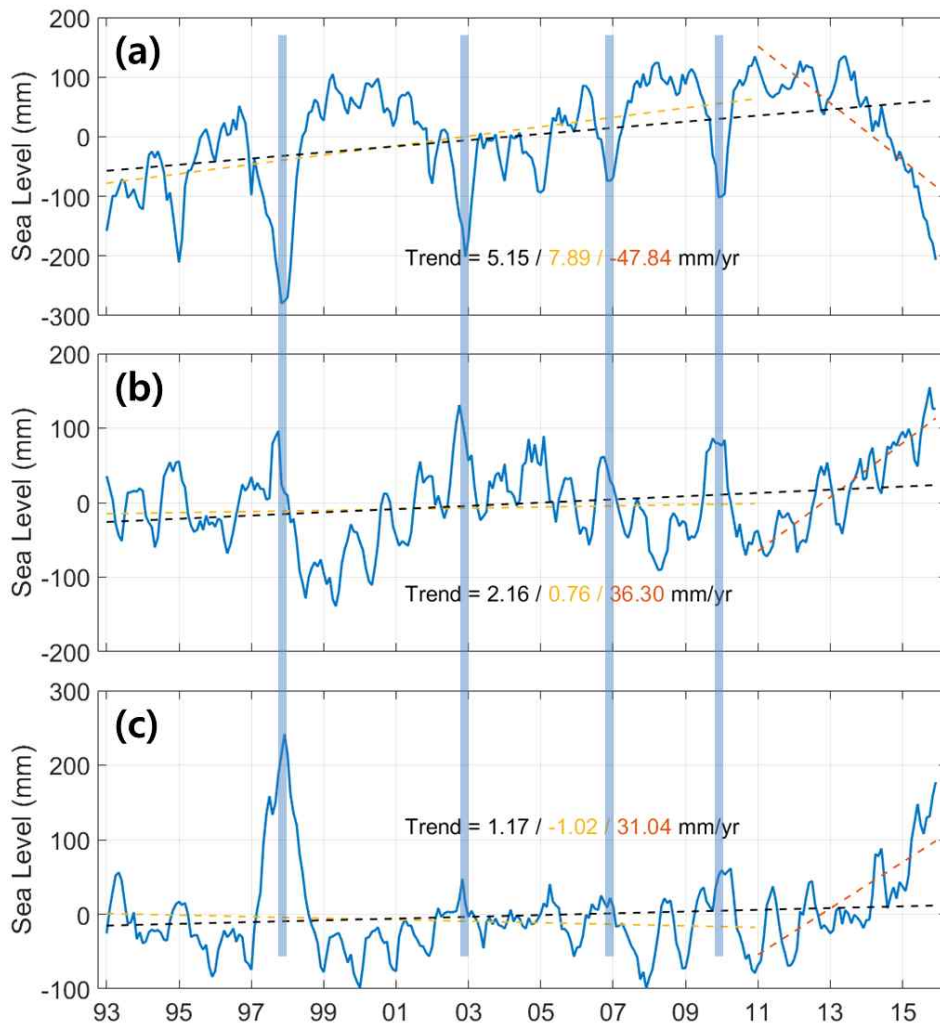


Fig. 6. Averaged sea level variability for (a) R1 (b) R2 and (c) R3. The linear trends were also plotted in each region for the period of 1993 to 2015 (black), 1993 to 2010 (yellow), and 2011 to 2015 (red dashed lines).

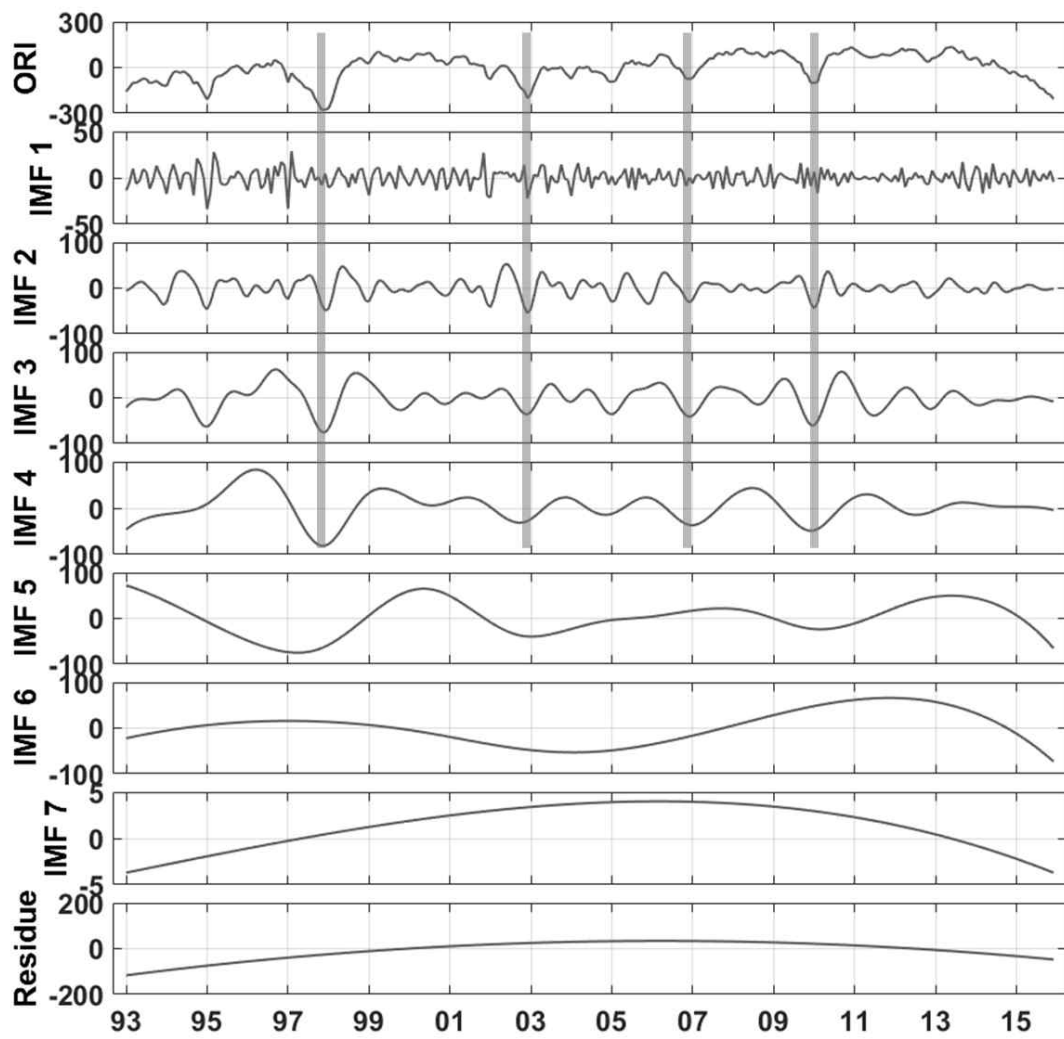


Fig. 7. The intrinsic mode functions and residue of sea level variability of R1.

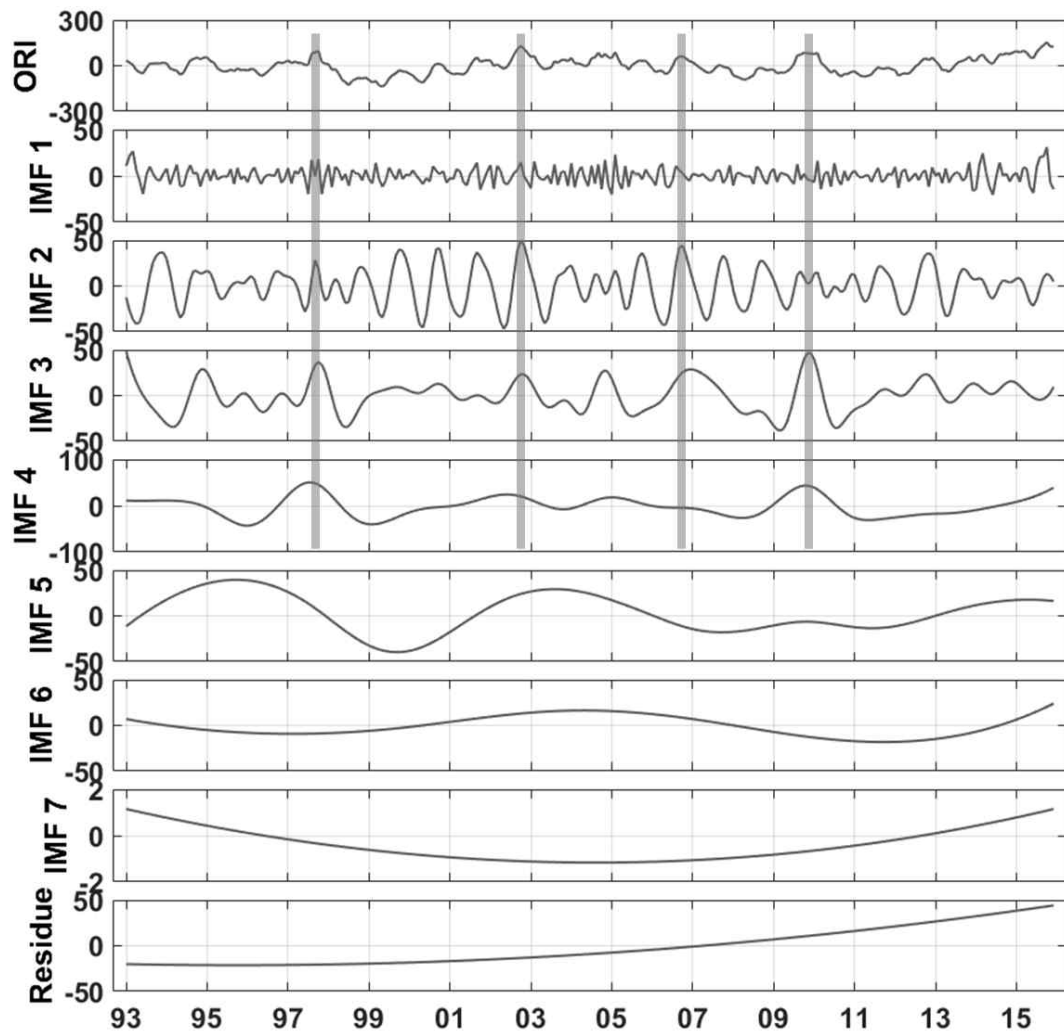


Fig. 8. The intrinsic mode functions and residue of sea level variability of R2.

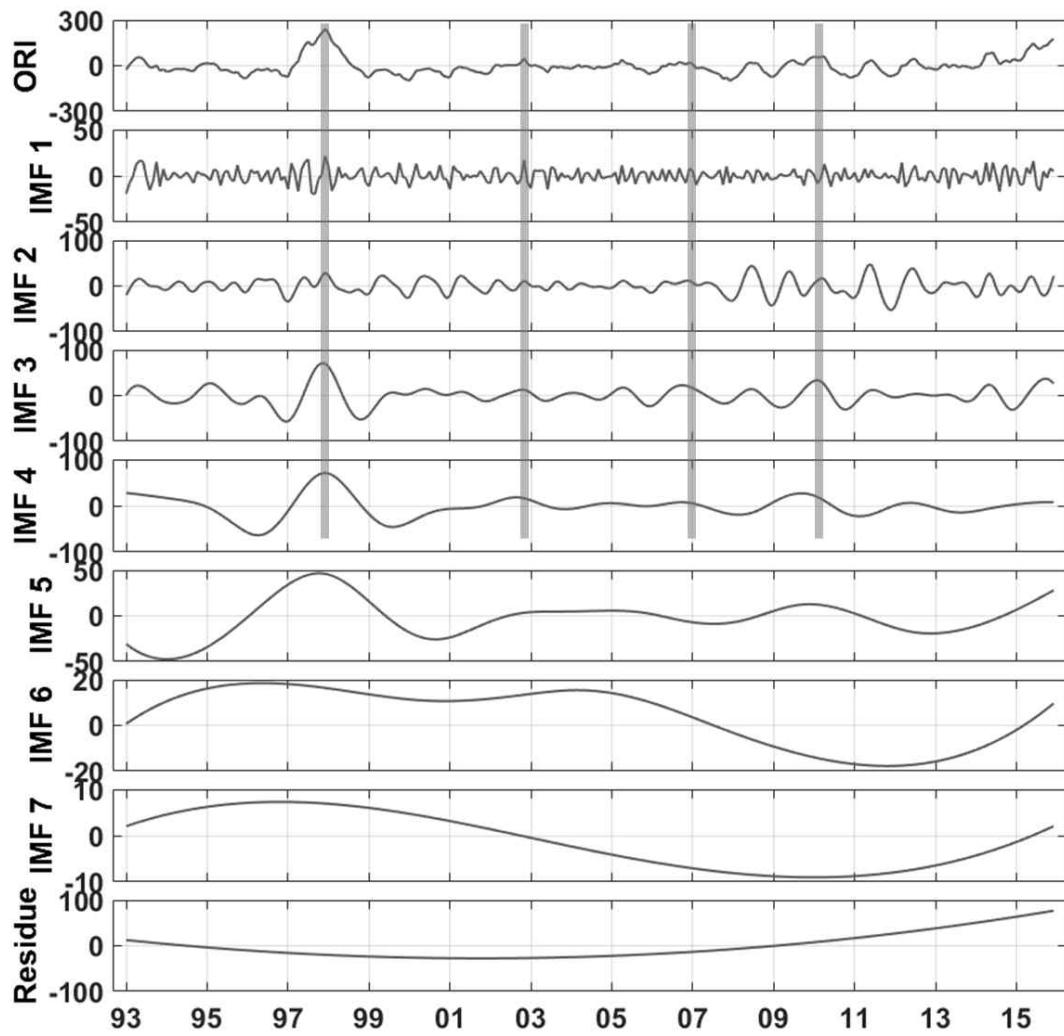


Fig. 9. The intrinsic mode functions and residue of sea level variability of R3.

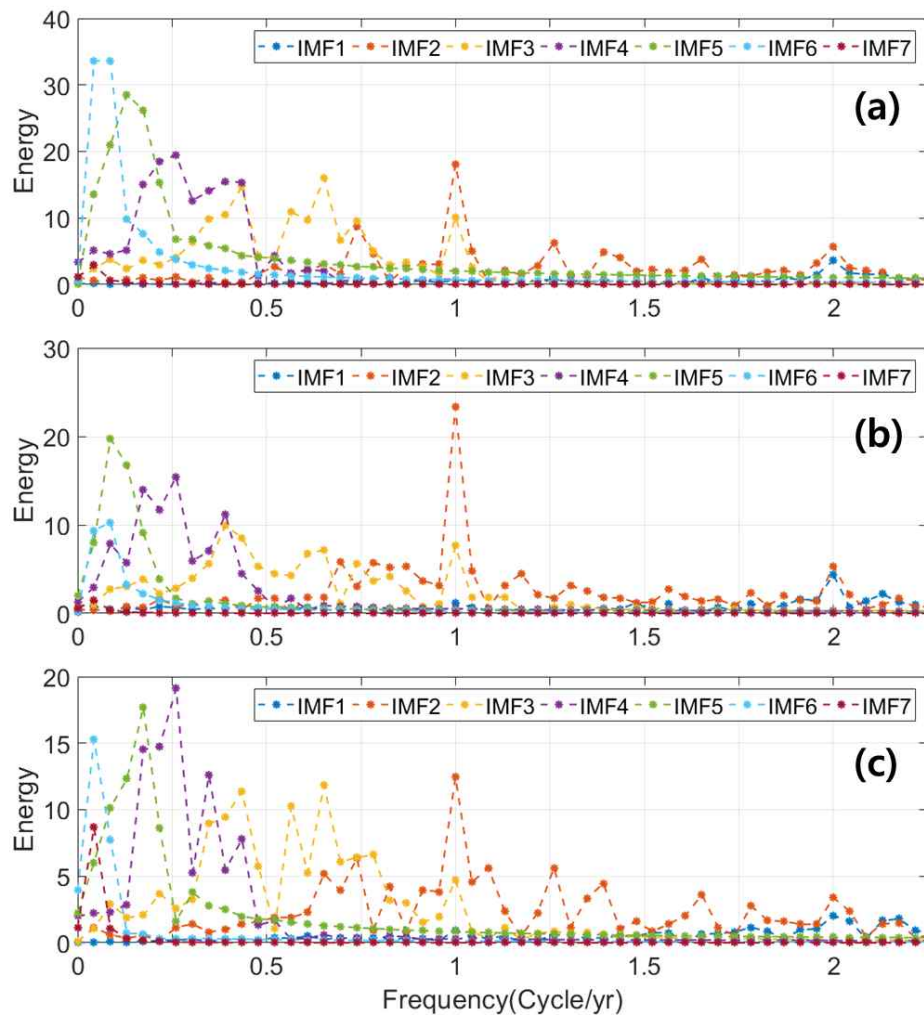


Fig. 10. Power spectra for each IMF of the sea surface height for (a) R1, (b) R2, (c) R3.

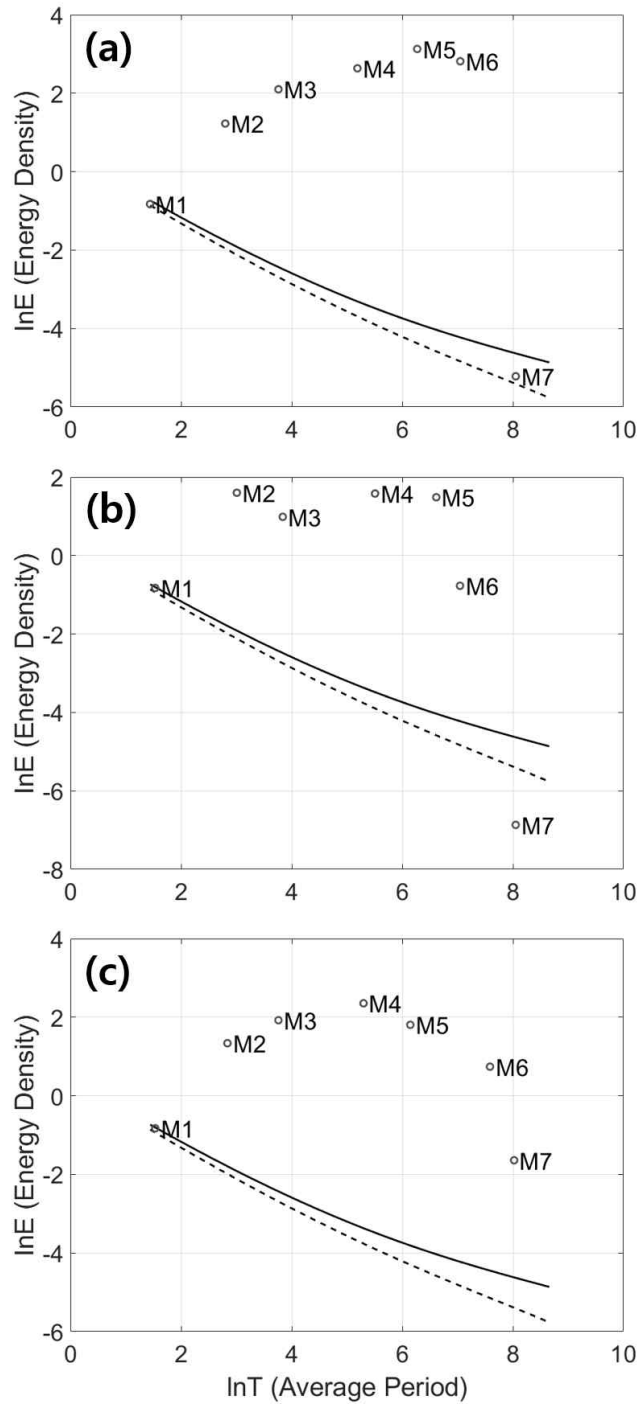


Fig. 11. The significance of each IMF of the sea surface height for (a) R1, (b) R2, and (c) R3. The significance was determined by calculating 95% and 99% confidence levels of spread function of white noise.

3.2 해수면 변동과 기후변동과 관련된 바람과 관계

지역별 해수면의 EEMD 분석결과는 장주기 해수면 변동성이 최근 열대 서태평양에서 하강하고 동태평양에서 상승하는 해수면 변화와 연관성이 있음을 보였다. 여기서는 열대 태평양에서의 해수면 변동성과 ENSO와 관련한 기후 변동성의 연관성을 파악하기 위해 MEI지수를 EEMD 분석한 후 지역별 해수면 결과와 비교 분석 하였다. 이전 장과 같은 방법으로 MEI지수에 대해 EEMD 분석을 수행했고, 그 결과 분해된 내재 모드 함수를 Fig. 12에 나타내었다. 또한, 통계적 유의성 검증결과와 스펙트럼 분석을 통한 모드별 에너지분포를 Fig. 13에 제시하였다. EEMD로 분해된 모든 내재 모드 함수들은 99% 신뢰구간 밖에 위치하여 원자료에 영향을 미치는 유의한 변동성으로 판별된다(Fig. 13a). IMF2는 1년 주기가 강하게 나타나고 IMF3은 1.5년에서 2.5년 IMF4는 4년에서 강하게 나타난다. 특히, IMF3-4는 엘니뇨-라니냐의 경년 변동성이 두드러지는데 이는 R2와 R3 지역 해수면의 경년 변동과 일치하며 R1 지역과는 반대 위상을 보인다. IMF5-7은 장주기 변동성으로 7년에서 20년 사이에 최대에너지 피크가 나타나고 지역별 해수면의 장주기 변동성(IMF5-7)과도 비슷한 주기를 보인다. 주목할 만한 점은 MEI의 원자료에서도 지역별 해수면 변동성과 유사하게 2011년 이후로 빠르게 상승하는 경향성이 나타난다는 것이다. 최근의 이러한 상승패턴은 장주기 모드 함수인 IMF5와 IMF6에서 뚜렷하게 나타나는데 이는 R2와 R3 지역 해수면의 장주기 변동성에서 나타난 최근 변동성과 일치하고 R1 지역 해수면의 장주기 변동성과는 반대 변동성을 보인다.

열대 태평양의 무역풍 변화는 ENSO 변동성과 밀접한 연관성이 있을 뿐만 아니라 열대 태평양의 해수면 변화에도 큰 영향을 미친다(Wyrski, 1975; Merrifield and Maltrud, 2011; Moon et al., 2013). 무역풍과 지역별 해수면이나 MEI로부터 분해된 변동성과 연관성을 확인하기 위해 열대 태평양해역(Fig. 14)의 동서 방향 바람 성분을 평균하여 시간에 대한 무역풍 변화를 확인하였고, 이를 EEMD 분석하여 지역별 해수면 변동성 및 기후 변동성과의 연관성을 분석했다. 무역풍 시계열 자료는 EEMD를 통해 짧은 주기의 IMF1에서 장주기인 IMF7까지 총 7개의 내재 모드 함수와 장주기 경향성인 잔차로 추출되었다(Fig. 15). 통계적 유의성

검정결과는 IMF7을 제외한 나머지 내재 모드 함수에서 모두 유의미한 변동성을 가지고 있음을 보인다(Fig. 16a). 단주기 모드(IMF1-3)인 경우 지역별 해수면 변화나 MEI지수로부터 분해된 모드별 주기와 비교해서 약간 짧은 주기를 보인다. 예를 들어, IMF2에서 반년 주기의 변동성이 강하게 나타나고 IMF3에서 1년 주기의 최대에너지 피크가 나타난다(Fig. 16b). 하지만 장주기를 나타내는 IMF5와 IMF6은 약 7년과 12년에서 최대에너지 주기를 보이면서 지역별 해수면 변화나 MEI지수로부터 추출된 IMF와 비슷한 주기를 나타낸다. 특히, 무역풍의 원시계열자료에서도 지역별 해수면이나 MEI와 같이 2011년 이후로 경향성이 급격히 바뀌는데 이러한 변화가 IMF5-6의 장주기 변동성에서 뚜렷하게 나타난다. 이는 지역별 해수면 변화와 ENSO, 무역풍의 장주기 변동성이 서로 강하게 연관성 있음을 보여준다. 지역별 해수면, 무역풍, 그리고 MEI의 장주기 변동성과의 상관관계를 Table 1에 제시하였다. 여기서 IMF7은 다른 IMF에 비해 작은 에너지를 보일 뿐만 아니라 R2 지역과 무역풍 변화의 경우 백색 잡음과 구별하기 힘들다. 따라서 각 자료로부터 추출된 IMF5와 IMF6의 합을 장주기 변동성으로 정의했고, 각각의 자료는 서로 다른 진폭을 가지기 때문에 정규화하여 Fig. 17에 나타냈다. R1 지역의 장주기 해수면 변동성은 MEI지수의 장주기 변동성과 반대 패턴을 보이면서 강한 음의 상관관계(-0.97)가 나타난다. 반면에 R2와 R3 지역의 해수면 변동과 무역풍 변동은 MEI와 강한 양의 상관관계를 보인다.

이러한 결과는 열대 태평양의 해수면, ENSO, 그리고 무역풍 사이에 강한 역학적인 연관성이 있고, ENSO와 관련된 장주기 바람 패턴의 변화가 열대 태평양에서 장주기 해수면 변화에 영향을 주는 것을 의미한다. Fig. 18a는 태평양 해수면과 바람 편차(wind anomaly)를 ENSO의 장주기 변동성(Fig. 18b)에 대해 회귀분석한 결과를 나타낸다. 이 패턴이 보여주는 것은 ENSO의 장주기 변동성(Fig. 18b)에 따른 공간적인 해수면과 바람 편차의 변화이다. ENSO의 장주기 변동성이 양의 값일 때 바람 패턴은 열대 태평양에서 무역풍의 약화와 북태평양에서 반시계 방향의 바람 편차를 나타내며, 변동성이 음의 값일 때는 반대 패턴이 나타난다. 해수면 패턴은 ENSO 장주기 변동성과 관련한 바람 패턴에 직접 상응하는 분포양상을 나타낸다. 무역풍의 약화로 인해 열대 서태평양 해수면은 하강하는 반면 열대 동태평양은 해수면이 상승하고 북태평양의 반시계방향 바람 회전장으로

동태평양 연안을 따라 상승하는 해수면 분포가 나타난다. 이러한 결과는 ENSO의 장주기 변동성과 관련된 바람 패턴이 열대 태평양뿐만 아니라 태평양 전 지역 해수면 패턴에 영향을 주는 것을 의미한다.

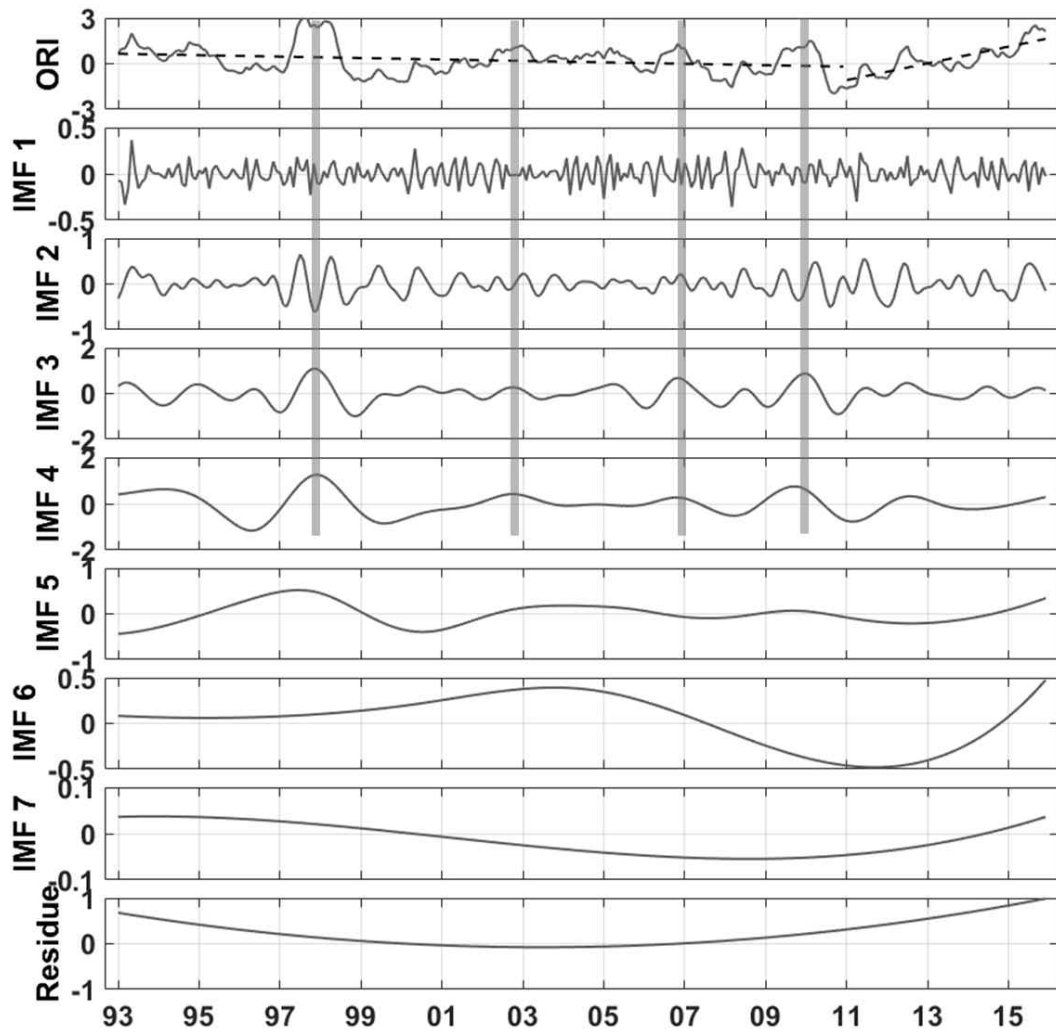


Fig. 12. The intrinsic mode functions and residue of MEI.

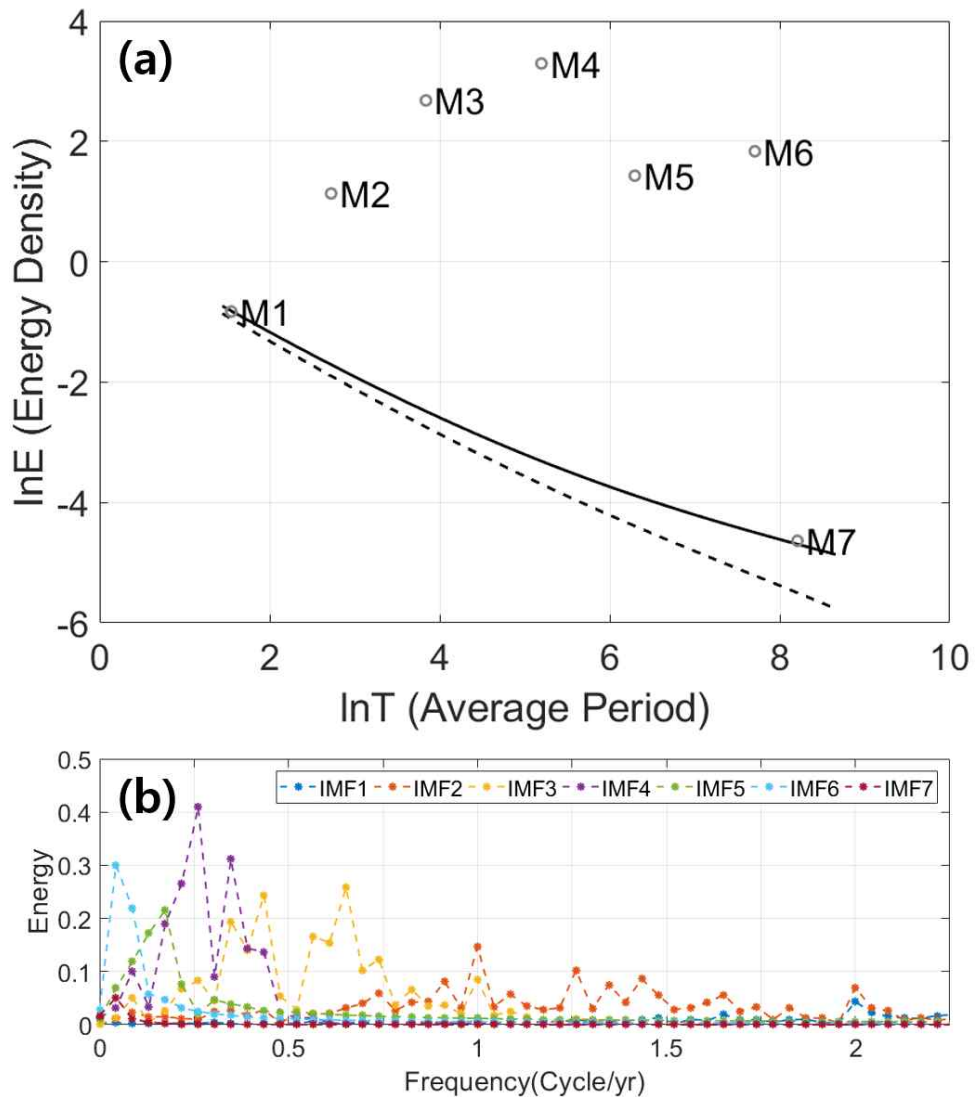


Fig. 13. (a) Significance test of each IMF of the MEI. (b) Power spectra for each IMF of the MEI.

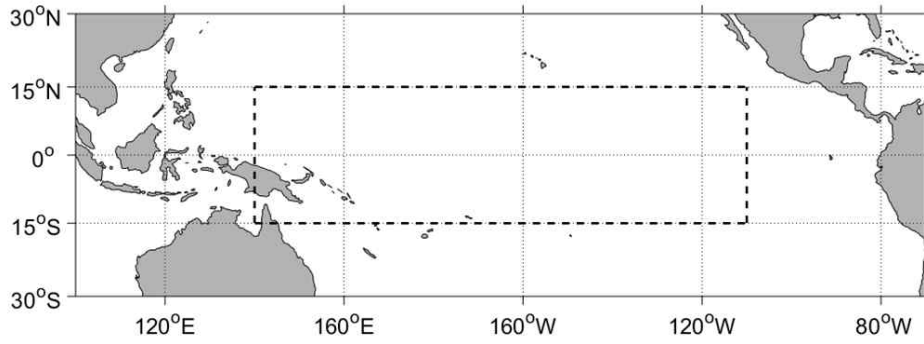


Fig. 14. The trade wind region where the east-west component of wind stress was spatially averaged.

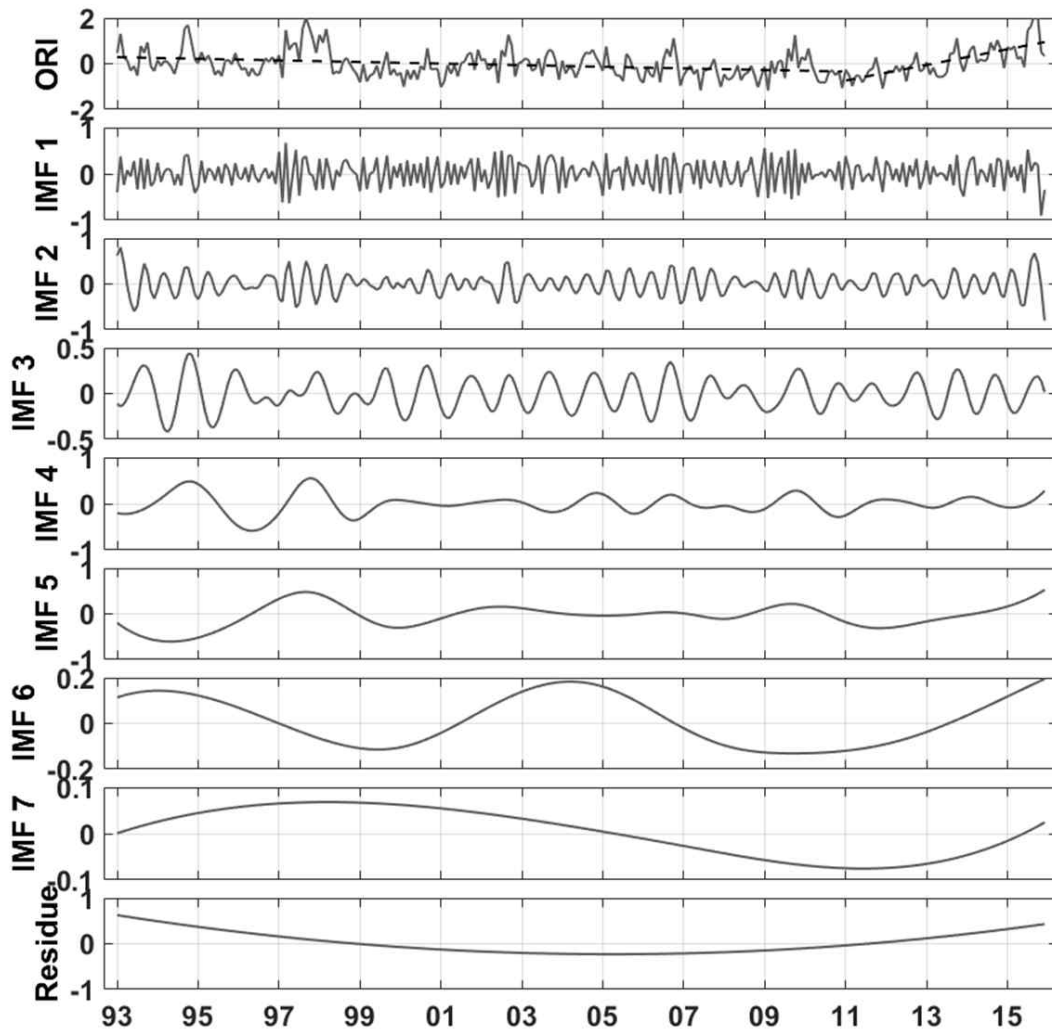


Fig. 15. The intrinsic mode functions and residue of trade wind.

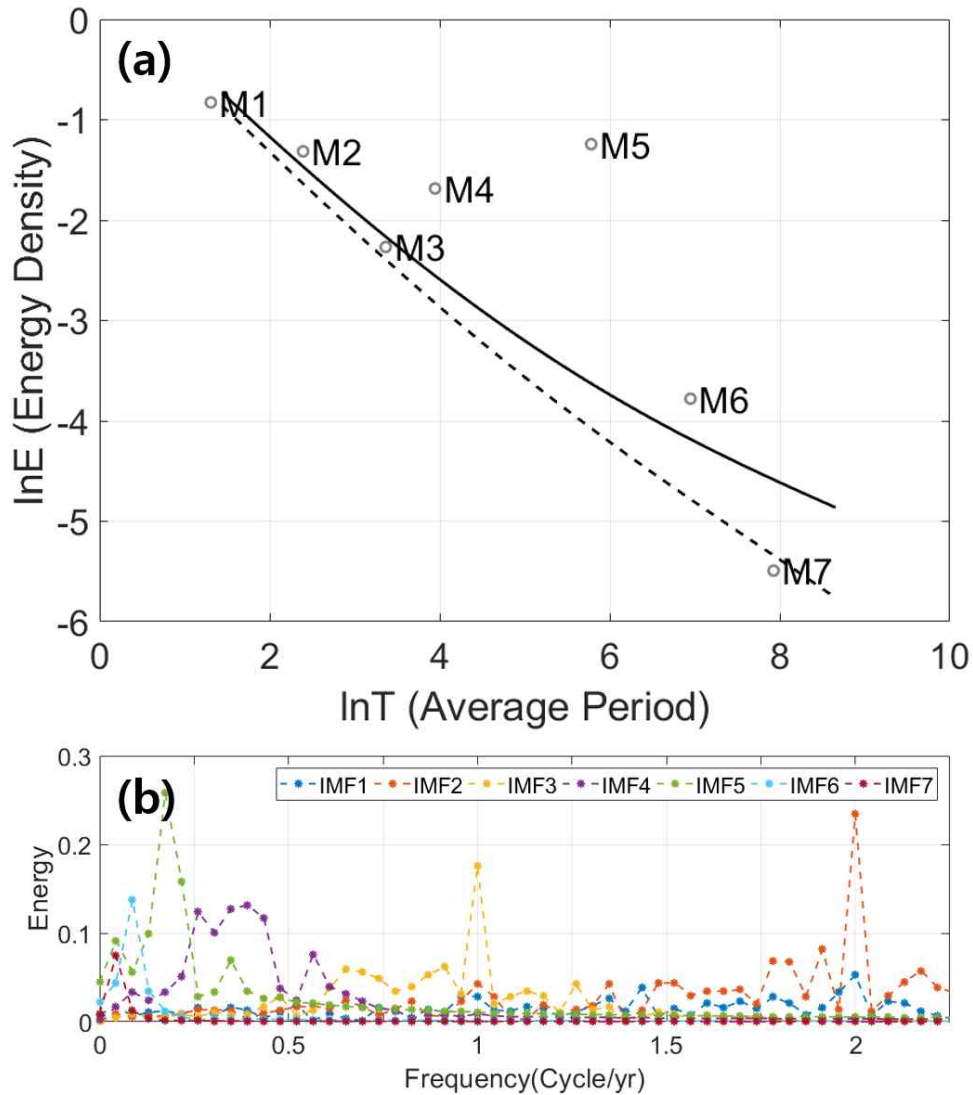


Fig. 16. (a) Significance test of each IMF of the trade wind. (b) Power spectra for each IMF of the trade wind.

Table 1. Correlation with low-frequency of MEI and low-frequency of R1, R2, R3, and trade wind.

	Region 1	Region 2	Region 3	Trade Wind
MEI index	-0.97	0.58	0.85	0.76

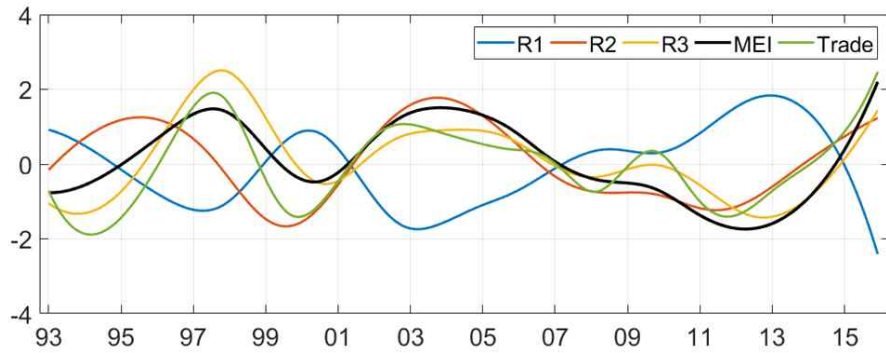


Fig. 17. Low-frequency variability (IMF5+IMF6) for R1, R2, R3, MEI, and Trade wind. Each variability is normalized by their standard deviations.

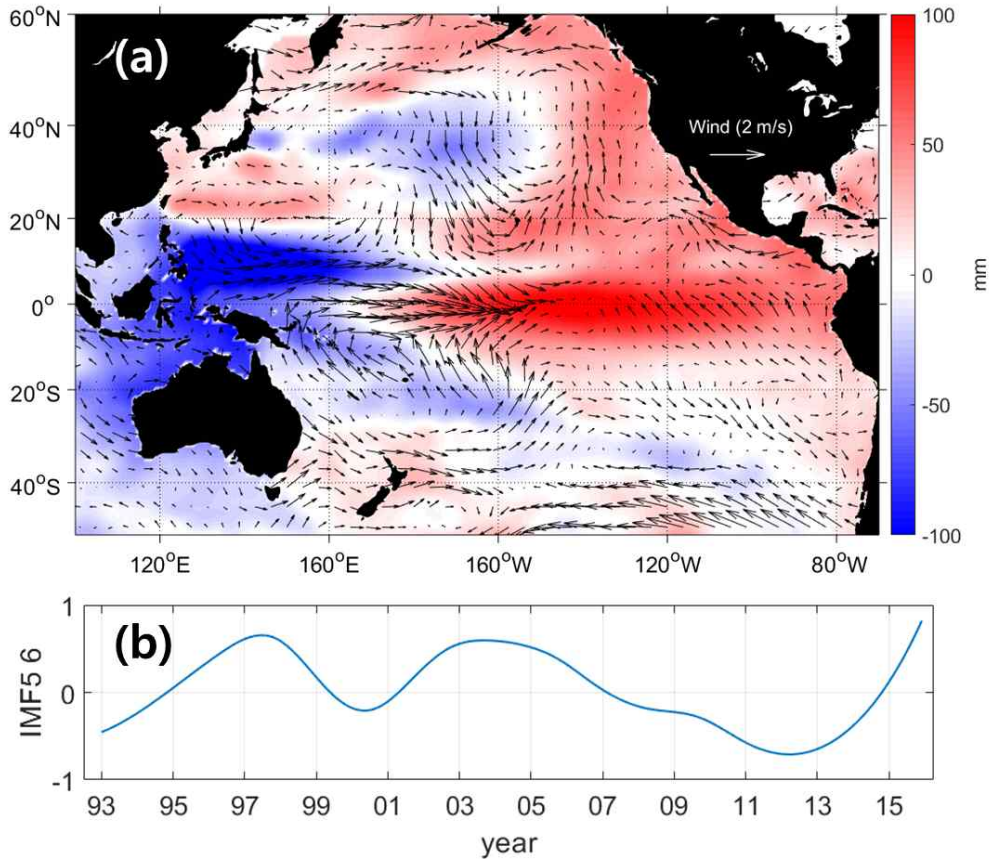


Fig. 18. (a) Regressed wind and sea level patterns onto the (b) low-frequency (IMF5+IMF6) of the MEI from 1993 to 2015.

3.3 모델로 재현된 장주기 해수면 변동

EEMD를 적용한 자료분석결과는 ENSO의 장주기 변동성과 관련된 바람 패턴이 열대 태평양에서 무역풍 변화와 북태평양에서 바람 회전장을 결정하고, 이러한 바람 패턴이 해수면의 장주기 변동과 밀접한 연관성이 있음을 보였다. 이 장에서는 ENSO의 장주기 변동성과 관련된 바람 패턴에 대한 해양의 역학적인 반응을 확인하기 위해 전 지구 해양순환모델을 사용해 실험을 수행하였다. 모델실험은 두 가지 경우에 대해 수행되었다. 첫째는 제어실험(control case)으로 재분석장인 NCEP/NCAR의 월별 대기 외력장을 사용하여 모델 적분을 수행한 실험이고, 두 번째는 1993년부터 2015년까지 ENSO의 장주기 변동성과 관련된 바람 패턴을 적용한 실험이다. 이 두 실험결과를 비교함으로써 최근 해수면의 급격한 변화가 장주기 바람 패턴의 역학적 반응으로서 재현되는지를 확인할 수 있다. 실험에 사용된 모델은 부시네스크근사(Boussinesq approximation)가 적용되고 있어 수온, 염분 변화에 의한 해양의 열팽창효과를 반영하지 못하기 때문에 모델 결과로부터 0-2000m까지 열염분 해수면 높이(steric height, ζ_s)를 계산하여 위성자료와 비교하였다.

$$\zeta_s = -\frac{1}{\rho_0} \int_{-H}^0 (\rho - \rho_0) dz \quad (3)$$

여기서 ρ_0 는 0°C 수온과 35psu의 염분을 갖는 해수 밀도를 의미하며 ρ 는 관측 해수 밀도를 나타낸다.

ENSO와 관련된 장주기 바람에 대한 실험을 수행하기 이전에 제어실험의 결과가 실제 위성 관측된 해수면 변화를 잘 모의하는지 확인할 필요가 있다. Fig. 19는 1993년부터 2015년까지 열대 태평양 세 지역(Fig. 5)에 대해 공간 평균된 위성 해수면과 제어실험을 통해 재현된 해수면의 변화를 나타낸다. 모델로 재현된 해수면 변화는 모든 지역에서 위성자료와 0.85 이상의 높은 상관관계를 보이고 1997년 엘니뇨에 의한 열대 동태평양과 열대 서태평양 해수면의 급격한 상승과 하강과 같은 경년 변동성이 위성자료와 잘 일치한다. 최근 5년 동안 모델로 재현된 해수면 변화는 R1 지역에서 -36mm/yr, R2와 R3 지역에서 22mm/yr와 14mm/yr

의 상승률을 보이면서 열대 서태평양에서 하강하고 동태평양에서 상승하는 패턴이 잘 나타난다. 모델 해수면 경향성은 최근 5년 동안 관측된 해수면 경향성에 비하여 작게 나타나는데 이는 모델이 담수 유입에 의한 질량 변화가 고려되지 않았기 때문이다. 모델 결과는 시간적인 변화뿐만 아니라 공간적인 해수면 변화 또한 위성자료와 상당 부분 일치하는 결과를 제시한다. 위성자료에서 관측된 2011년 전후로 반대되는 해수면 경향성과 비교를 위해 1993년부터 2010년까지와 2011년부터 2015년까지 모델 해수면 변화의 경향성을 Fig. 20에 나타내었다. 모델로 재현된 해수면 경향성은 태평양 전 지역에서 같은 기간 위성 해수면 자료에서 나타난 경향성(Fig. 1a,c)과 최근 경향성의 급격한 변화와 매우 유사한 공간패턴을 나타낸다. ENSO의 장주기 변동성과 관련된 바람 패턴이 해수면 변화에 어떤 영향을 주는지 확인하기 위해 각 격자의 평균 바람장(Fig. 21a)에 태평양 바람 편차를 ENSO의 장주기 변동성(Fig. 21c)에 대해 회귀분석한 결과를 더 하여 새롭게 재구성된 바람장을 모델에 적용하였다. 이렇게 재구성된 바람을 적용하고 다른 외력장은 기존의 NCEP/NCAR 재분석장을 그대로 사용하여 1993년에서 2015년까지 모델을 수행했다. Fig. 22는 추가로 수행된 모델실험결과로 열대 태평양 세 지역의 모델 해수면 변화를 나타낸다. 모델은 장주기 기후 변동성과 관련된 바람 패턴만 적용되었기 때문에 재현된 해수면 변화는 바람 자료에 상응하는 장주기 해수면 변동을 보여준다(주황색, Fig. 22). 모델 해수면 변화와 관측결과의 비교를 위해 위성자료에서 각 지역 해수면의 장주기 변동성(IMF5+IMF6)을 제시하였다(파란색, Fig. 22). 모델 해수면은 93년 초부터 몇 년간 불안정하게 변하는 모습을 보이고 약간의 시간 지연(time lag)이 발견되는데 이는 93년부터 기존 바람 패턴과 다른 장주기 기후변동성과 관련된 바람이 적용되면서 조정(adjustment)되는 시기를 겪기 때문으로 판단된다. 하지만, 그 이후에 모델 결과는 지역별 해수면의 장주기 변동성을 잘 따라갈 뿐만 아니라, 최근 급격한 변동을 잘 모의한다. 모델로 재현된 해수면의 경향성은 최근 5년 동안 R1, R2, R3 지역에서 각각 -21.5mm/yr, 14.3mm/yr, 12.3mm/yr로 나타난다. 이는 제어실험 결과에서 재현된 상승률의 60%, 65%, 86%를 차지하고, 위성자료에서 나타난 상승률의 45%, 40%, 39%에 해당하는 수치이다. 이러한 해수면의 역학적인 반응은 공간적인 해수면 분포에서도 분명하게 나타난다. Fig. 23은 재구성된 바람장을 사용한 모델 해수면

변화의 최근 5년 경향성을 공간분포로 나타낸 그림이다. 모델 해수면 경향성은 위성에서 최근 관측된 열대 서태평양에서 하강하고 동태평양에서 상승하는 해수면 패턴과 일치할 뿐만 아니라 태평양 전체 해역에 걸쳐 관측되는 해수면 패턴 과도 거의 일치한다. 모델실험결과는 ENSO와 관련된 장주기 바람 패턴이 태평양에서의 장주기 해수면 변동성을 발생시키고, 특히 최근 열대 태평양에서 관측된 급격한 해수면 변화가 이러한 장주기 해수면 변동의 영향임을 확인시켜 주었다.

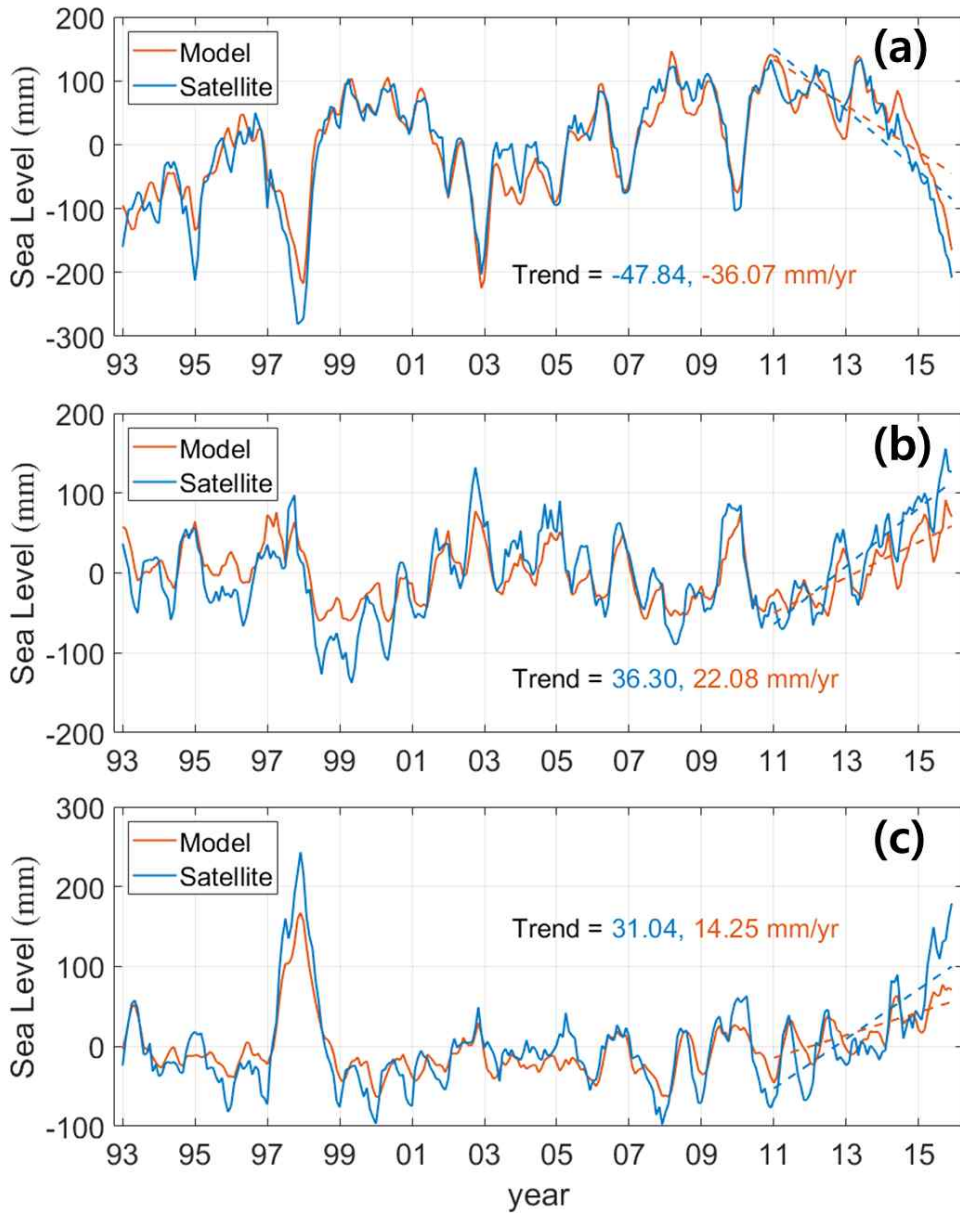


Fig. 19. Comparison between satellite altimetry (blue) and modeled (red) sea level variability for (a) R1, (b) R2, and (c) R3. Correlations of satellite altimetry and modeled sea level are 0.94(a), 0.85(b) and 0.91(c) in each region.

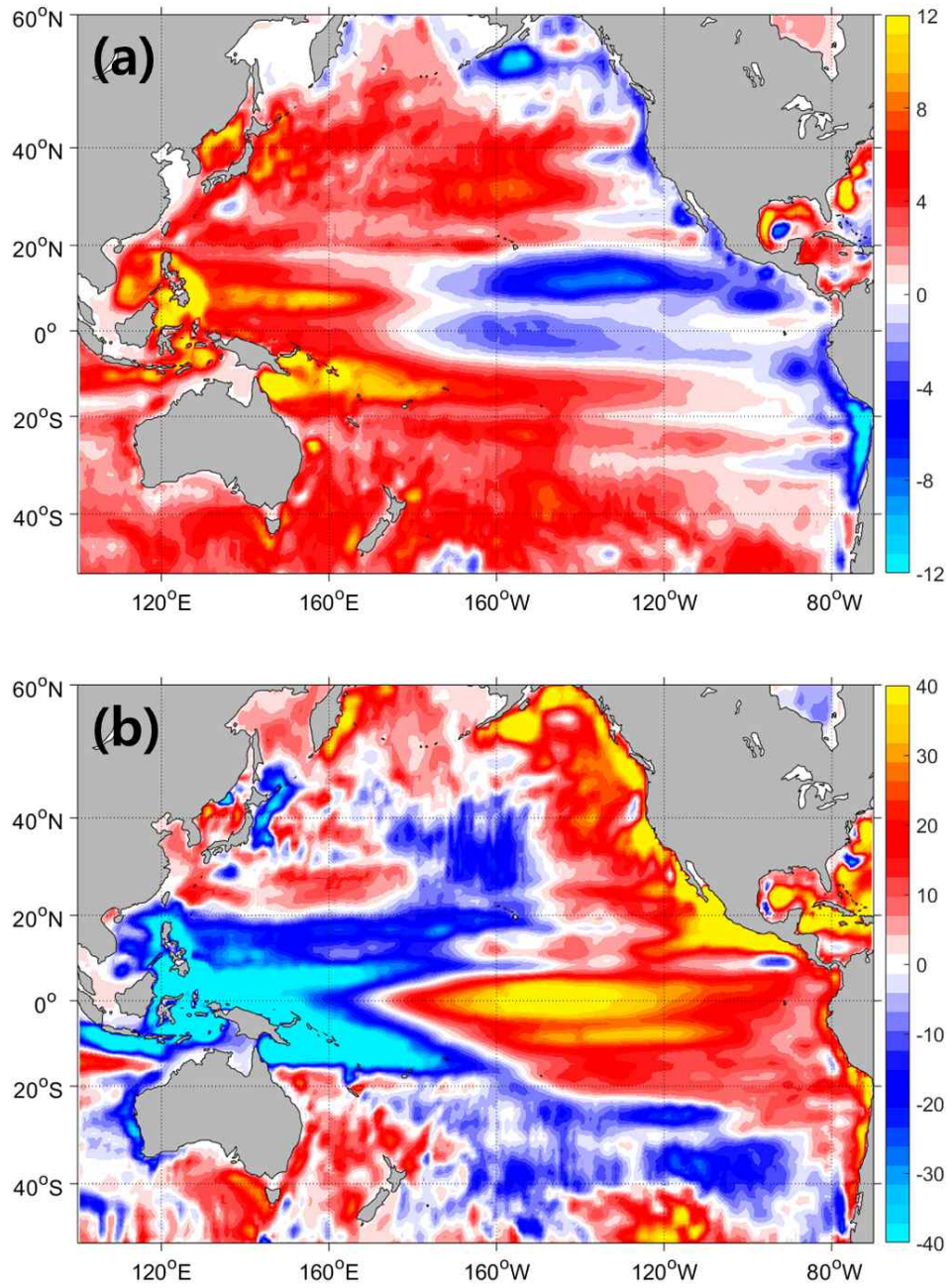


Fig. 20. Sea level trend from (a) 1993 to 2010 and (b) 2011 to 2015, based on modeled sea level variability.

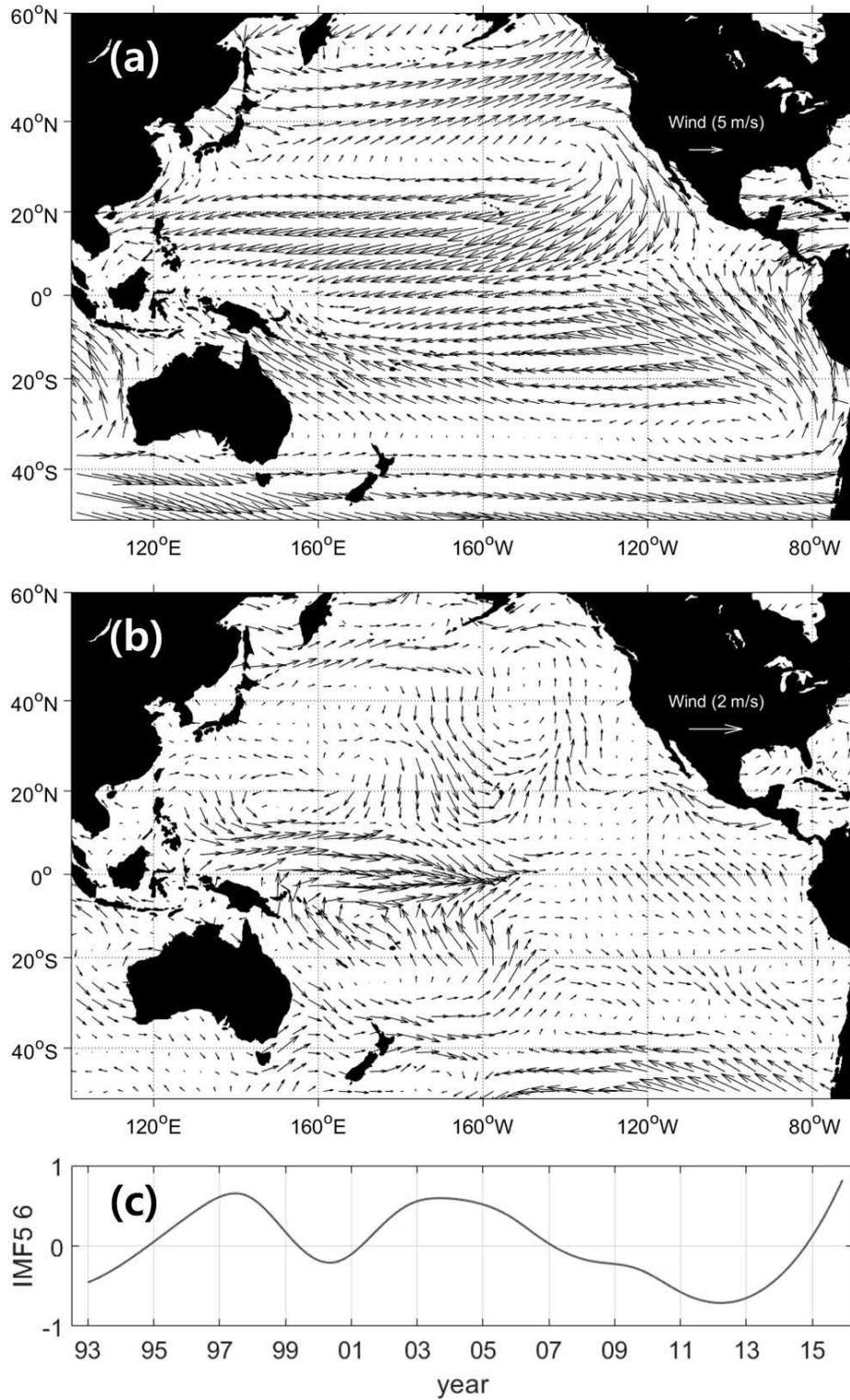


Fig. 21. (a) Mean wind pattern of each grid. (b) Regressed wind patterns onto the (c) low-frequency (IMF5+IMF6) of the MEI from 1993 to 2015.

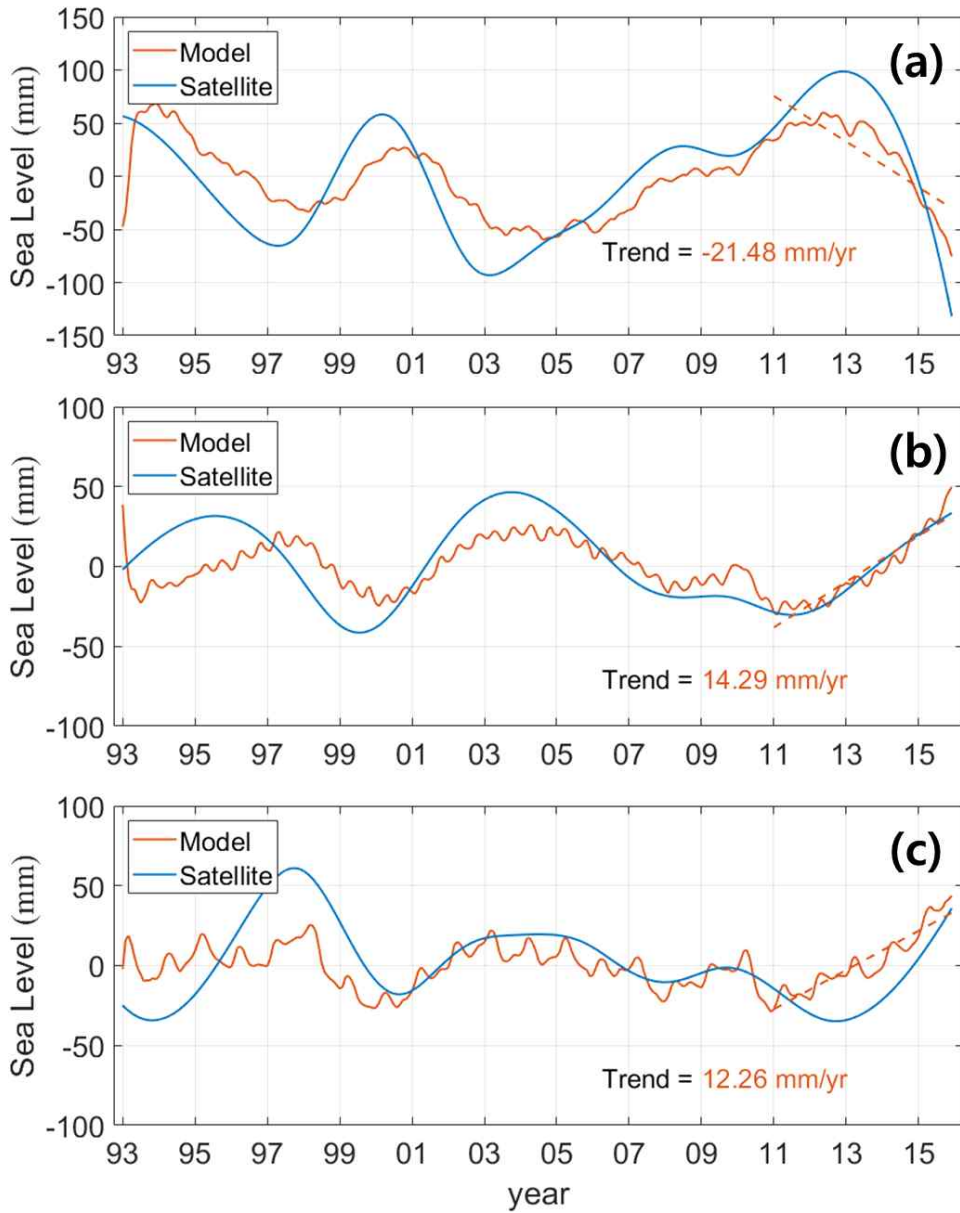


Fig. 22. Comparison between low-frequency sea level variability based on satellite altimetry (blue line) and modeled sea level variability forced by wind related to low-frequency of MEI for (a) R1, (b) R2, and (c) R3.

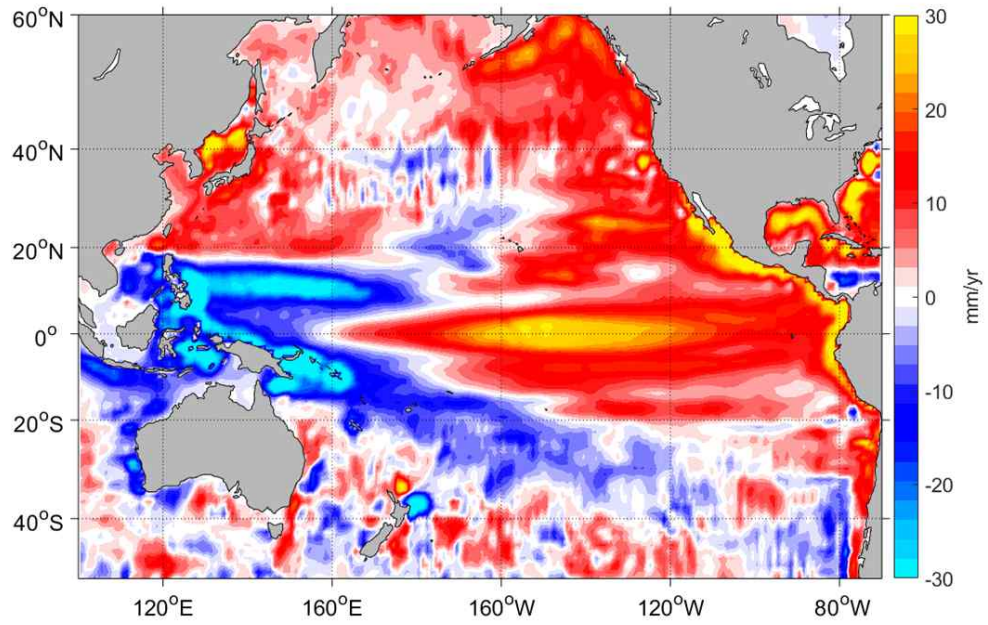


Fig. 23. Sea level trend from (a) 1993 to 2010 and (b) 2011 to 2015, based on modeled sea level variability which forced by wind related to low-frequency of MEI.

4. 결론

지역적인 해수면 변화는 대규모 해양-대기순환과 관련된 기후 변동성이 포함되어 나타난다. 태평양에서 ENSO는 다양한 시간 규모의 변동성을 가지고 있을 뿐만 아니라 대규모 바람 패턴과 밀접한 관련이 있어 해수면 변화에 영향을 준다. 기존의 많은 연구는 위성관측 이후 열대 서태평양 해수면은 빠르게 상승하고 동태평양 해수면은 감소하거나 정체되는 지역적인 편차를 보고했다. 하지만 2011년을 전후로 기존의 상승패턴과는 반대로 열대 서태평양에서 하강하고 동태평양에서 상승하는 패턴이 나타났다. 지역적인 해수면 변화로부터 기후변동성과 관련된 자연 변동성을 분리하는 것은 지역 해수면 변화를 예측하고 해수면 상승에 의한 연안 피해를 방재하는 데 있어 매우 중요하다. 그럼에도 불구하고 자연현상은 비선형과 비정상과정을 포함하고 있어 시계열 자료로부터 내재된 고유 주기의 변동성을 정확하게 분해하는 것은 힘들다. 본 연구에서는 비선형과 비정상자료에도 적용 가능한 EEMD를 사용하여 최근 나타난 해수면의 변화와 기후변동과 관련된 ENSO와 연관성을 분석했다. 또한, 기후 변동성과 관련된 바람 패턴이 해수면 변화에 어떤 영향을 주는지 확인하기 위해 전 지구 해양모델을 사용하여 해수면의 역학적 반응을 실험하였다.

해수면 변화의 주기별 변동성을 추출하기 위해 EEMD를 사용하여 열대 태평양 서 지역의 평균 해수면 변화를 분석하였다. EEMD 분석결과 내재적 모드 함수가 단주기 모드(IMF1)에서 장주기 모드(IMF7) 순으로 7개의 모드와 최종적으로 경향성을 나타내는 잔차로 분해되었다. 모든 해역에서 IMF3과 IMF4는 2-5년 주기의 경년 변동성을 나타내며, R1 지역의 해수면 변동과 R2와 R3 지역의 해수면 변동이 서로 반대되는 ENSO와 관련된 변동특징이 잘 나타난다. 장주기 해수면 변동성을 나타내는 IMF5-6은 지난 몇 년간 R1 지역에서 급격하게 하강하고 R2와 R3 지역에서 반대로 상승하는 변동을 보이는데, 이러한 장주기 패턴의 변화는 최근 열대 태평양에서 관측된 급격한 해수면 변화와 일치한다. IMF7의 경우 주기가 ~20년인 장주기 성분을 나타내지만, 통계적 유의성 검증결과 해수면 변동

성에 유의미한 영향이 있다고 보기 어렵고 다른 IMF에 비하여 에너지가 매우 작으므로 분석에서 제외했다.

주기별로 분해된 열대 태평양 해수면 변동성과 ENSO 변동성 및 무역풍 변화의 연관성을 파악하기 위해 MEI지수와 열대해역에서 동서 방향 바람의 평균 변화를 EEMD 분석하여 해수면 변동성과 비교하였다. 분석결과 무역풍 변화의 단주기 모드(IMF1-3)들은 지역별 해수면 변화나 MEI지수로부터 추출된 단주기 IMF와 비교해서 짧은 주기를 보이지만 IMF5-7의 장주기 모드는 7-20년으로 비슷한 주기를 나타낸다. MEI지수나 무역풍 변화의 원시계열자료에서도 지역별 해수면과 같이 2011년 전후로 경향성이 바뀌는데 이러한 변화는 장주기 변동성인 IMF5와 IMF6에서 뚜렷하게 나타난다. 지역별 해수면, 무역풍 그리고 MEI장주기 변동성은 서로 높은 상관관계를 나타내고 각 변동성 들은 역학적인 연관성을 보인다. 회귀분석을 사용하여 장주기 ENSO 변동성에 대한 바람 패턴과 해수면 패턴을 확인해본 결과, 바람 패턴은 열대 태평양에서 무역풍 변화와 북태평양의 바람 회전성과 연관성을 보이고, 해수면 패턴은 열대 태평양에서 동서 방향 해수면 변화와 동태평양 연안에서 발생하는 해수면 변화를 나타내면서 바람 패턴과 상응하는 분포를 보인다.

ENSO의 장주기 변동성과 관련된 바람 패턴이 해수면 변화에 미치는 영향을 확인하기 위해 회귀분석을 사용하여 재구성한 바람 패턴을 해양모델에 적용하여 1993년부터 2015년까지 해수면 변화를 확인하였다. 모델로 재현된 해수면 변화는 조정(adjustment) 시기 동안 불안정하게 변하지만 이후 위성자료에서 나타난 지역별 해수면의 장주기 변동성을 잘 따라가고 최근 급격한 해수면 변동을 잘 모의한다. 이러한 해수면의 역학적인 반응은 공간분포에서도 분명히 나타난다. 최근 5년 동안 모델 해수면 경향성은 위성자료에서 관측된 열대 태평양의 해수면 패턴뿐만 아니라 태평양 전체 해역의 패턴과도 거의 일치한다. 이는 최근 열대 태평양에서 관측된 급격한 해수면 변화가 장주기 기후 변동성과 관련된 해수면 변동의 영향임을 보여준다.

기존의 H2016은 CSEOF를 사용하여 최근 나타난 해수면 변화가 ENSO, PDO와 관련된 장주기 해수면 변동성임을 보였다. 본 연구에서도 H2016과 유사하게 최근 나타난 해수면 변화가 ENSO의 장주기 변동성과 관련된 해수면 변동임을 제

시하고 있지만, EEMD를 사용하여 최근 나타난 해수면 변화와 관련된 특정 주기 변동성을 분해했다는 점과 해양모델을 활용하여 장주기 기후 변동성에 대한 해수면의 역학적인 반응을 확인했다는 점에서 H2016과 차이를 보인다. ENSO의 장주기 변동성과 관련된 장주기 해수면 변동성은 10년 이상의 주기를 가지고 진동하기 때문에 최근 나타난 열대 서태평양에서 하강하고 동태평양에서 상승하는 해수면 변화는 앞으로 수년간 지속될 것이다. 또한, 해수면 자료로부터 주기를 갖는 자연 변동성을 분리하여 그 영향을 파악함으로써 향후 자연변동성과 인위적 상승을 포함하는 지역적인 해수면 상승을 보다 정확하게 예측하는데 기여할 수 있을 것으로 생각된다. 그럼에도 불구하고 이 연구에서는 해양모델을 사용하여 ENSO 기후 변동성과 관련된 바람이 해수면 변화에 미치는 영향만을 고려하고 있다. 따라서 향후 ENSO 이외에 다양한 기후 변동성과 관련된 태평양 해수면 변동을 조사할 필요가 있다.

5. 요약

해수면 변화는 경년에서 수십 년에 이르는 다양한 시간 규모를 갖는 자연적인 해양-기후 변동성에 영향을 받는다. 1990년대 초 이후 위성고도계 관측자료는 열대 서태평양에서 빠른 해수면 상승과 동태평양에서 정체되거나 감소하는 경향성을 보였다. 하지만, 최근 몇 년간 이러한 상승패턴과는 반대로 열대 서태평양 해수면은 크게 하강하고 동태평양 해수면은 증가하는 급격한 해수면 변화가 나타났다. 이러한 해수면 상승패턴의 급격한 변화가 단주기 기후 변동성과 관련된 일시적인 변화인지 혹은 장주기 기후 변동성과 관련된 장기적인 변화인지 파악하는 것은 해수면 상승에 따른 대응체계를 마련하는 데 있어 중요하다. 본 연구에서는 최근 나타난 상승패턴의 급격한 변화가 단주기 변동성과 관련된 일시적인 변화인지 장주기 변동성과 관련된 변화인지 파악하기 위해 앙상블 경험적 모드 분해법(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD, Wu and Huang, 2009)을 사용하여 지역별 해수면 자료로부터 주기별 변동성을 분리하였고 태평양 기후 변동성 및 바람과의 연관성을 분석하였다. 또한, 태평양에서 해수면 변동과 기후 변동성과의 관계를 이해하기 위해 태평양의 장주기 기후지수와 관련된 바람 패턴을 분리한 후 전 지구 해양모델을 이용하여 장주기 바람 패턴에 대한 해수면 변화의 역학적인 반응을 실험하였다. 분석결과에 의하면, 최근 나타난 해수면 상승패턴의 급격한 변화는 기후변동의 장주기 변동성뿐만 아니라 그와 관련된 바람과 밀접한 연관성을 보였다. 모델실험 결과 장주기 기후 변동성과 관련된 바람 패턴에 대한 해수면 변화는 최근 나타난 해수면 상승패턴의 급격한 변화를 잘 보여준다. 다시 말해, 태평양에서 장주기 기후 변동성과 그와 관련된 바람 패턴은 태평양의 지역별 해수면의 장주기 변동성에 영향을 준다.

참고문헌

- Ablain, M., Cazenave, A., Valladeau, G., and Guinehut, S. (2009). A new assessment of global mean sea level from altimeters highlights a reduction of global trend from 2005 to 2008. *Ocean Science Discussions*, 6(1), 31.
- Arakawa, A., and Lamb, V. R. (1977). Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Methods in computational physics*, 17, 173-265.
- Beckley, B. D., Zelensky, N. P., Holmes, S. A., Lemoine, F. G., Ray, R. D., Mitchum, G. T., Desai, S. D., and Brown, S. T. (2010). Assessment of the Jason-2 extension to the TOPEX/Poseidon, Jason-1 sea-surface height time series for global mean sea level monitoring. *Marine Geodesy*, 33(S1), 447-471.
- Church, J. A., Aarup, T., Woodworth, P. L., Wilson, W. S., Nicholls, R. J., Rayner, R., Lambeck, K., Mitchum, G. T., Steffen, K., Cazenave, A., Blewitt, G., Mitrovica, J. X., and Lowe, J. A. (2010). Sea-level rise and variability: synthesis and outlook for the future. *Understanding sea-level rise and variability*, 402-419.
- Church, J. A., and White, N. J. (2011). Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surveys in Geophysics*, 32(4-5), 585-602.
- Di Lorenzo, E. (2003). Seasonal dynamics of the surface circulation in the Southern California Current System. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(14), 2371-2388.
- Fairall, C. W., Bradley, E. F., Hare, J. E., Grachev, A. A., and Edson, J. B. (2003). Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm. *Journal of climate*, 16(4), 571-591.
- Haidvogel, D. B., Arango, H. G., Hedstrom, K., Beckmann, A., Malanotte-Rizzoli, P., and Shchepetkin, A. F. (2000). Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates. *Dynamics of*

- atmospheres and oceans, 32(3), 239-281.
- Hamlington, B. D., Cheon, S. H., Thompson, P. R., Merrifield, M. A., Nerem, R. S., Leben, R. R., and Kim, K. Y. (2016). An ongoing shift in Pacific Ocean sea level. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(7), 5084-5097.
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N., Tung, C. C., and Liu, H. H. (1998, March). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. In *Proceedings of the Royal Society of London A: mathematical, physical and engineering sciences* (Vol. 454, No. 1971, pp. 903-995). The Royal Society.
- Kidwell, A., Jo, Y. H., and Yan, X. H. (2014). A closer look at the central Pacific El Niño and warm pool migration events from 1982 to 2011. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(1), 165-172.
- Kim, Y., and Cho, K. (2016). Sea level rise around Korea: Analysis of tide gauge station data with the ensemble empirical mode decomposition method. *Journal of Hydro-environment Research*, 11, 138-145.
- Large, W. G., McWilliams, J. C., and Doney, S. C. (1994). Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Reviews of Geophysics*, 32(4), 363-403.
- Landerer, F. W., Jungclaus, J. H., and Marotzke, J. (2008). El Niño–Southern Oscillation signals in sea level, surface mass redistribution, and degree-two geoid coefficients. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C8).
- Lee, H. S., Yamashita, T., and Mishima, T. (2012). Multi-decadal variations of ENSO, the Pacific Decadal Oscillation and tropical cyclones in the western North Pacific. *Progress in oceanography*, 105, 67-80.
- Lei, Y., He, Z., and Zi, Y. (2009). Application of the EEMD method to rotor fault diagnosis of rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(4), 1327-1338.
- Leuliette, E. W., and Scharroo, R. (2010). Integrating Jason-2 into a multiple-altimeter climate data record. *Marine Geodesy*, 33(S1), 504-517.

- Marchesiello, P., McWilliams, J. C., and Shchepetkin, A. (2003). Equilibrium structure and dynamics of the California Current System. *Journal of Physical Oceanography*, 33(4), 753-783.
- Masters, D., Nerem, R. S., Choe, C., Leuliette, E., Beckley, B., White, N., and Ablain, M. (2012). Comparison of global mean sea level time series from TOPEX/Poseidon, Jason-1, and Jason-2. *Marine Geodesy*, 35(sup1), 20-41.
- Merrifield, M. A. (2011). A shift in western tropical Pacific sea level trends during the 1990s. *Journal of Climate*, 24(15), 4126-4138.
- Merrifield, M. A., and Maltrud, M. E. (2011). Regional sea level trends due to a Pacific trade wind intensification. *Geophysical Research Letters*, 38(21).
- Moon, J. H., Song, Y. T., Bromirski, P. D., and Miller, A. J. (2013). Multidecadal regional sea level shifts in the Pacific over 1958–2008. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(12), 7024-7035.
- Moon, J. H., Song, Y. T., and Lee, H. (2015). PDO and ENSO modulations intensified decadal sea level variability in the tropical Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(12), 8229-8237.
- Nerem, R. S., Chambers, D. P., Choe, C., and Mitchum, G. T. (2010). Estimating mean sea level change from the TOPEX and Jason altimeter missions. *Marine Geodesy*, 33(S1), 435-446.
- Qiu, B., and Chen, S. (2010). Interannual-to-decadal variability in the bifurcation of the North Equatorial Current off the Philippines. *Journal of Physical Oceanography*, 40(11), 2525-2538.
- Shchepetkin, A. F., and McWilliams, J. C. (2005). *The Regional Ocean Modeling System: A Split-Explicit, Free-Surface, Topography-Following-Coordinate Ocean Model*, 2003. University of California at Los Angeles: Institute of Geophysics and Planetary Physics.
- Song, Y. T., and Wright, D. G. (1998). A general pressure gradient formulation for ocean models. Part II: Energy, momentum, and bottom torque consistency. *Monthly Weather Review*, 126(12), 3231-3247.

- Wilkin, J. L., Arango, H. G., Haidvogel, D. B., Lichtenwalner, C., Glenn, S. M., and Hedström, K. S. (2005). A regional ocean modeling system for the Long-term Ecosystem Observatory. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C6).
- Wu, Z., & Huang, N. E. (2004, June). A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (Vol. 460, No. 2046, pp. 1597-1611). The Royal Society.
- Wu, Z., and Huang, N. E. (2009). Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. *Advances in adaptive data analysis*, 1(01), 1-41.
- Wyrtki, K. (1975). El Niño—the dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *Journal of Physical Oceanography*, 5(4), 572-584.
- Zhang, X., and Church, J. A. (2012). Sea level trends, interannual and decadal variability in the Pacific Ocean. *Geophysical Research Letters*, 39(21).
- 김한빈, 김태림, 신흥준, 허준행. (2017). 앙상블 경험적 모드분해법을 활용한 비정상성 확률분포형의 매개변수 추세 분석에 관한 연구. *한국수자원학회 논문집*, 50(4), 253-261.
- 박성호, 최주호. (2017). 전달오차의 EEMD 적용을 통한 기어 결함분류연구. *한국전산구조공학회 논문집*, 30(2), 169-177.