

Article

위성 고도계와 해수면 재구성 자료를 이용한 기후변동성에 따른
태평양 해수면 변화

차상철 · 문재홍*

제주대학교 해양과학대학 지구해양학과
(63243) 제주특별자치도 제주시 제주대학로 102

Pacific Sea Level Variability associated with Climate Variability from Altimetry
and Sea Level Reconstruction Data

Sang-Chul Cha and Jae-Hong Moon*

*Department of Earth, Marine Science, Jeju National University
Jeju 63243, Korea*

Abstract : Previous studies have indicated a great regional difference in Sea Level Rise (SLR) in the Pacific and it has been suggested that this is linked to climate variability over the past two decades. In this study, we seek to identify the possible linkage between regional sea level and Pacific climate variability from altimetry-based sea level data (1993–2012) and further investigate how the Pacific sea level has changed spatially and temporally over the past 60 years from long-term sea level reconstruction data (1953–2008). Based on the same method as Zhang and Church (2012), the Inter-annual Climate Index (ICI) associated with the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and the Decadal Climate Index (DCI) associated with Pacific Decadal Oscillation (PDO) are defined and then the multiple variable linear regression is used to analyze quantitatively the impact of inter-annual and decadal climate variability on the regional sea levels in the Pacific. During the altimeter period, the ICI that represents ENSO influence on inter-annual time scales strongly impacts in a striking east-west “see-saw mode” on sea levels across the tropical Pacific. On the other hand, the decadal sea level pattern that is linked to the DCI has a broad meridional structure that is roughly symmetric in the equator with its North Pacific expression being similar to the PDO, which largely contributes to a positive SLR trend in the western Pacific and a negative trend in the eastern Pacific over the two most recent decades. Using long-term sea level reconstruction data, we found that the Pacific sea levels have fluctuated in the past over inter-annual and decadal time scales and that strong regional differences are presented. Of particular interest is that the SLR reveals a decadal shift and presents an opposite trend before and after the mid-1980s; i.e., a declining (rising) trend in the western (eastern) Pacific before the mid-1980s, followed by a rising (declining) trend from the mid-1980s onward in the western (eastern) Pacific. This result indicates that the recent SLR patterns revealed from the altimeters have been persistent at least since the mid-1980s.

Key words : Sea level rise, climate variability, ENSO, PDO, multi-variable linear regression

*Corresponding author. E-mail : jhmoon@jejunu.ac.kr

1. 서 론

지구 온난화로 인한 전지구적 해수면 상승은 세계 각국의 저지대 및 해안 도시 침수문제와 직접 관련이 있기 때문에 국제사회의 최우선 의제로 부상하고 있다. 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 5차보고서(Assessment Report, AR5)에 의하면(IPCC 2013), 전지구 평균 해수면은 1901년부터 2010년까지 약 0.19 ± 0.02 m 상승했고, 평균 해수면 상승률은 같은 기간 약 1.7 ± 0.2 mm/yr로 나타났지만 1993년부터 2010년 사이에는 약 3.2 ± 0.4 mm/yr로 급격하게 증가한 것으로 보고되었다(Church and white 2011; Masters et al. 2012). 확률적인 기법을 사용한 최근 연구에서도 1900년부터 1990년까지 해수면 상승률은 1.2 ± 0.2 mm/yr로 1993년부터 2010년까지는 3.0 ± 0.7 mm/yr로 나타났다(Hay et al. 2015).

그러나 해수면 상승은 공간적으로 균일한 분포를 보이지 않으며 많은 지역에서 전지구 평균 해수면 상승률보다 높거나 낮은 상승률이 나타난다. 해수면 상승의 지역적인 편차는 특히 태평양에서 두드러지게 나타나는데, 예를 들어 지난 20년간 열대 서태평양의 해수면 상승은 전지구 평균 상승률과 비교해서 5배 이상 빠른 상승률을 나타낸 반면에 동태평양의 경우에는 해수면 상승이 거의 정체되거나 오히려 낮아지는 경향을 보였다(Church et al. 2010; Bromirski et al. 2011). 해수면 상승의 이러한 지역적 차이는 인류활동을 통한 인위적인 요인과 자연적인 기후변동성이 중첩되어 나타나는 현상으로, El Niño-Southern Oscillation (ENSO)와 Pacific Decadal Oscillation (PDO) 등 대규모 해양-대기순환과 관련되는 기후변동성은 태평양에서의 해수면 변화에 주된 요인이 되는 것으로 알려져 있다(Merrifield et al. 2012; Zhang and Church 2012; Moon et al. 2013, 2015). ENSO는 열대 태평양 지역에서의 해수면 온도 변화와 관련된 변동으로 주로 열대 해역의 경년 변동성을 야기하는 주요 인자가 되며 해수면 변화에도 큰 영향을 준다(Nerem et al. 1999; Lander et al. 2008). 수십 년 혹은 그 이상의 시간 규모에 있어서는 ENSO와 유사한 기후변동들이 존재하는데, 그 중에 PDO는 북태평양에서의 장주기 변동성을 대표하는 것으로 알려져 있다(Mantua et al. 1997). 북태평양 해수면 온도의 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function, EOF)로 정의되는 PDO는 열대 태평양 지역 뿐만 아니라 북태평양 전체범위에 걸쳐 동쪽과 서쪽이 반대되는 변동패턴을 나타내고 이는 ENSO의 경년 변동과는 구별된다. PDO와 관련된 대규모 바람패턴이 지난 20년간 서태평양의 해수면을 상승시키는데 기여했지만, 동태평양의 경우는 해수면 상승을 억제하는 역할을 했다(Moon et al. 2013, 2015;

Hamlington et al. 2014). 반면 최근 연구는 PDO가 하나의 특정 기후 신호(climate signal)가 아니라 서로 다른 열대 해역과 극 해역의 물리적 과정들의 결합에 의한 변동성을 제시하기도 했다(Di Lorenzo et al. 2015; Newman et al. 2016).

앞서 언급한 것처럼 지역적인 해수면 변화는 지구온난화에 의한 인위적 요인과 자연적인 기후변동성을 포함하고 있다. 특히 해양-대기의 자연변동성은 경년에서 수십 년에 이르는 다양한 시간규모의 변동성을 갖고 있어 온난화에 의한 해수면 상승을 정확하게 진단하고 평가하는데 어려움을 준다. 최근 Zhang and Church (2012)는 태평양의 기후시스템 변동성인 ENSO와 PDO가 지역적 해수면 상승에 얼마나 기여하는지를 위성 고도계 자료를 사용하여 분석하였다. 이를 위해 ENSO의 경년 주기를 나타내는 Inter-annual Climate Index (ICI)와 PDO의 십 년 변동성을 나타내는 Decadal Climate Index (DCI)로 분리하였고, 다변량 회귀분석(Multi Variable Linear Regression, MVLRL)을 이용하여 이들 변동성이 해수면 상승에 미치는 영향을 분석하였다. 하지만 Zhang and Church (2012)는 기후변동성을 구분하기엔 상대적으로 자료의 길이가 짧은 위성 고도계 자료(1993-2009년)만을 사용함으로써 장주기 기후변동성에 의한 해수면 변화를 파악하는데 제약이 있었고 위성 고도계 이전시기(1993년 이전)의 해수면 변화에 대한 기후변동성과의 관계는 고려되지 않았다. 따라서 이 연구에서는 최근 20여년 동안(위성 고도계기간)에 태평양에서의 지역별 해수면 상승 및 변동성이 위성 고도계 이전에는 어떠한 변화와 비교해서 시-공간적으로 어떻게 다른지를 분석하였다. 이를 위해 Zhang and Church (2012)에서 이용한 다변량 회귀분석을 위성 고도계 자료(1993-2012년)와 장기간 해수면 재구성 자료(1953-2008년)에 적용하였고, 두 자료의 분석을 통해 태평양의 지역 해수면 상승과 기후시스템 변동성과의 연관성을 평가하였다.

2. 자료 및 방법

위성 고도계 자료는 호주의 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO)에서 제공되고 있는 고도계 해수면 편차(Sea Surface Height Anomaly, SSHA) 자료를 이용하였다(e.g., Church et al. 2004). 이 자료는 NASA Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) 및 AVISO에서 제공되는 TOPEX/Poseidon (1992-2005), Jason-1 (2001-2013), Jason-2/OSTM (2008-현재) 위성 고도계 자료를 통합한 자료이다. 분석에 사용된 자료는 1993년부터 2012년까지 20년 동안의 자료이며 공간적으로 위도 65°S - 65°N 범위

의 $1^\circ \times 1^\circ$ 수평격자 간격을 가진다(http://www.cmar.csiro.au/sealevel/sl_data_cmar.html).

위성 고도계는 거의 전지구를 포함하는 해수면고도 자료를 제공하지만, 활용 가능한 자료의 기간이 1993년 이후로 제한되기 때문에 1993년 이전의 해수면 변화와 장기간 해수면 변동성을 파악하는데 제약이 따른다. 최근 들어, 위성 자료의 이러한 문제점을 보완하기 위해 장기간의 조위관측 자료를 활용해 과거 해수면 변화를 재구성하기 위한 다양한 시도가 이뤄지고 있다(e.g., Chambers et al. 2002; Church et al. 2004; Llovel et al. 2009; Hamlington et al. 2011; Meyssignac et al. 2012). 본 연구에서는 Cyclostationary Empirical Orthogonal Function (CSEOF) 통계 분석을 통해 재구성된 장기간 해수면 자료를 사용하여 위성기간 이전의 장기간 해수면 변동성을 확인하였다. Hamlington et al. (2011)은 CSEOF 분석을 활용하여 위성 고도계자료로부터 기저함수(basis functions)를 산출하고, 공간분포를 나타내는 기저함수를 장기간 조위관측 자료에 최소자승분석을 적용하여 1950에서 2008년까지 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 의 수평격자간격을 가지는 해수면 재구성 자료를 생산했다. 기존의 EOF 분석을 통한 재구성은 정상상태(stationary)의 공간분포를 제시하는 반면 CSEOF 분석을 활용한 재구성 자료는 공간분포의 일정한 주기의 변화 과정을 나타냄으로써 경년 및 ENSO와 관련된 변동성을 파악하는데 장점이 있다(Hamlington et al. 2011; Yeo and Kim 2013).

태평양에서 주된 기후변동성인 ENSO, PDO와 관련된 해수면 변동성을 파악하기 위해 MEI와 PDO 지수가 사용되었다. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA; <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>)에서 제공되는 MEI 지수는 NINO나 SOI 지수와 같이 해수면 압력이나 해수면 온도와 같은 단일 변수로 계산된 지수와는 다르게 열대 태평양에서 6개 변수(압력, 바람(u, v), 기온, 수온, 운량)를 통해서 정의되며 ENSO 변동을 연구하는데 많이 사용되는 지수이다. PDO 지수는 북태평양(20°N 이상) 해수면 온도(SST) 편차 경험 직교함수(EOF)의 첫 번째 모드로 정의(Mantua et al. 1997)되며 Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean (JISAO; <http://jisao.washington.edu/>)에서 제공한다. PDO의 시간적 변화는 경년(inter-annual) 변동성 뿐만 아니라 강한 십년(decadal) 변동성을 가지며 공간적 구조는 말굽모양과 유사하고 ENSO 모드에 의해 변조되는 특성을 보이기도 한다(Gershunov and Barnett 1998). ENSO와 PDO의 장주기 성분들은 서로 높은 상관관계를 보이기 때문에 ENSO와 PDO를 각각의 독립된 기후변동 모드로 볼 수 있는지에 대한 논의는 여전히 진행 중에 있다(e.g., Newman et al. 2003; Schneider and Cornuelle 2005; Deser et al.

2010). PDO와 ENSO를 각각의 독립된 모드로 구분하기 어렵기 때문에 Zhang and Church (2012)는 태평양에서의 경년 변동과 장주기 변동성에 초점을 맞추기 위해 6년 high-pass filter된 MEI와 low-pass filter된 PDO를 각각 ICI와 DCI로 정의한 새로운 기후지수를 제안하였다. 본 연구에서도 Zhang and Church (2012)과 같은 방법으로 두 변동성을 정의하였으며, 각각의 기후변동성 및 장기 경향성과 관련된 해수면 변동성을 분리하기 위해 다변량 회귀분석을 사용하였다.

$$\eta = a_0 + a_1t + a_2ICI + a_3DCI + \varepsilon_a \quad (1)$$

여기서, a_0 는 절편, a_1 은 다변량 회귀분석에서의 해수면 경향성을 나타낸다. a_2, a_3 는 독립변수 ICI, DCI 변화에 관련된 각각의 해수면 변동을 나타내는 회귀계수(regression coefficient)이며 ε_a 는 오차를 나타낸다. 또한 위성관측기간 및 해수면 재구성 자료 기간 동안 DCI가 해수면 상승에 미치는 영향을 알아보기 위해 시간과 DCI 기후변수로 구성된 다변량 회귀분석 식 (2)와 단순회귀분석 식 (3)을 사용하였다.

$$\eta = b_0 + b_1t + b_2DCI + \varepsilon_b \quad (2)$$

$$\eta = c_0 + c_1t + \varepsilon_c \quad (3)$$

단순 회귀분석(식 (3))에서 변화율 c_1 과 기후변동성에 의한 해수면 변동성이 고려된 다변량 회귀분석(식 (1)–(2))의 변화율 a_1, b_1 의 차이를 통해서 해수면 상승률에 대한 DCI의 기여도를 분석했다.

3. 결 과

위성 고도계 기간 동안의 해수면 변화

최근 20년간(1993–2012년) 위성 고도계로부터 평가된 태평양에서의 해수면 상승분포를 Fig. 1에 나타냈다. 해수면 상승은 서태평양에서 강화되고 동태평양에서 약화되는 지역적인 차이를 드러내는데, 특히 열대 태평양에서 그 차이가 뚜렷하게 나타난다. 이러한 해수면 상승의 공간적인 분포는 기후변화에 의한 인위적인 신호와 자연변동성이 혼합되면서 나타난다(Bromirski et al. 2011; Zhang and Church 2012; Moon et al. 2015).

여기서는 MEI와 PDO로부터 경년 변동과 장주기 변동성을 구분하여 태평양의 해수면 변화를 분석하였다. MEI에 6년 high-pass 필터를 적용한 ICI는 연평균 MEI에서 나타나는 ENSO와 관련된 변동성과 잘 일치하며 MEI 분산의 대부분을 설명하고 있다(Fig. 2a). 따라서 태평양의 경년 기후변동성을 나타내기 위해 ICI 지수는 사용되었다. PDO는 십년 및 그 이상의 장기 변동성을 대표하는 태평

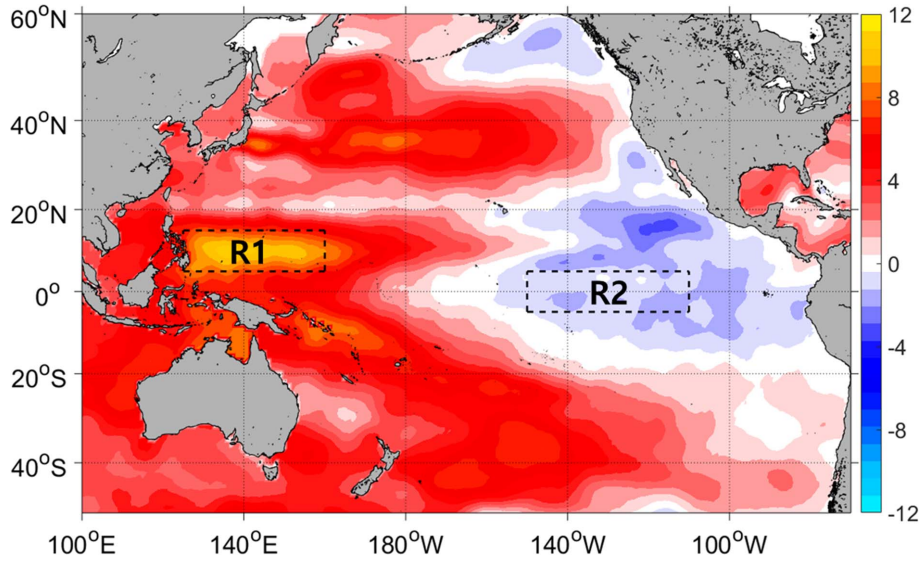


Fig. 1. Sea level trend (mm/yr) from 1993 to 2012 based on altimeter measurement data

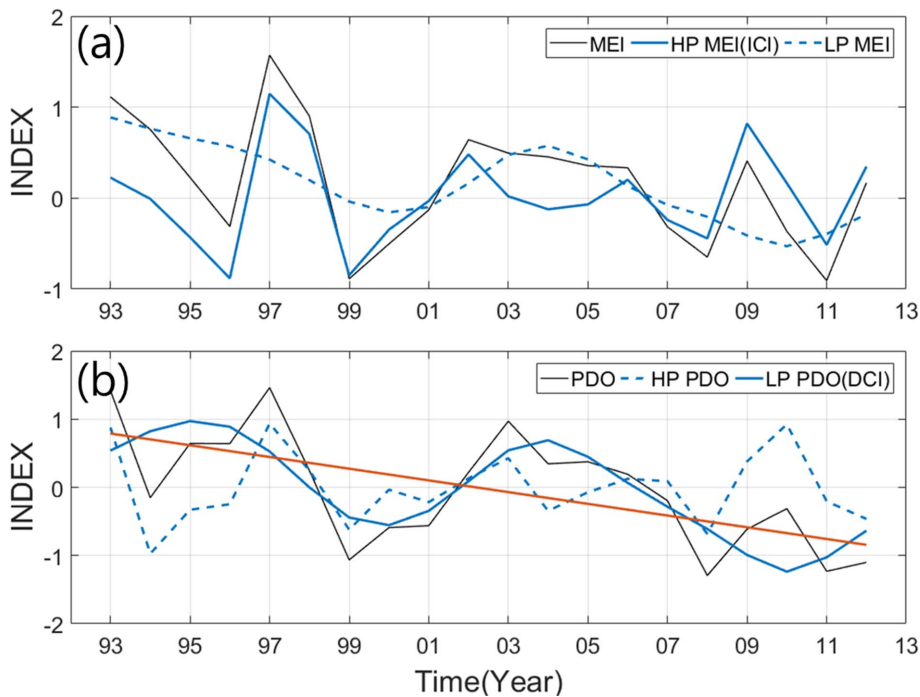


Fig. 2. (a) MEI index (black) and its high-pass filtered (blue line) and low-pass filtered (dashed) components. (b) Same as (a), but for the PDO. The linear trend of DCI (low-pass filtered PDO) is plotted as red line

양 기후지수로 알려져 있지만 Fig. 2b에 제시된 것처럼 ENSO와 같은 강한 경년 변동성 또한 포함하고 있다. 그러므로 PDO에 low-pass 필터를 적용함으로써 PDO로부터 경년 변동을 분리하였고 이를 DCI로 정의하여 태평양의 장기 기후변동성을 나타내기 위해 사용하였다. 그리고 이들 경년 및 장기 기후변동성에 대한 해수면 변동패턴을

확인하기 위해 다변량 회귀분석(식 (1))으로부터 ICI와 DCI에 대한 공간적인 해수면 변동패턴(fingerprint), 즉 회귀계수 a_2 와 a_3 의 공간분포를 각각 제시하였다(Fig. 3). ICI에 의한 해수면 변동 패턴(Fig. 3a)은 위도 20°S–20°N 범위의 열대 태평양해역에서 변동성이 강하게 나타나는 특징을 보인다. 열대 서태평양에서 대략 -80 mm로 해수면

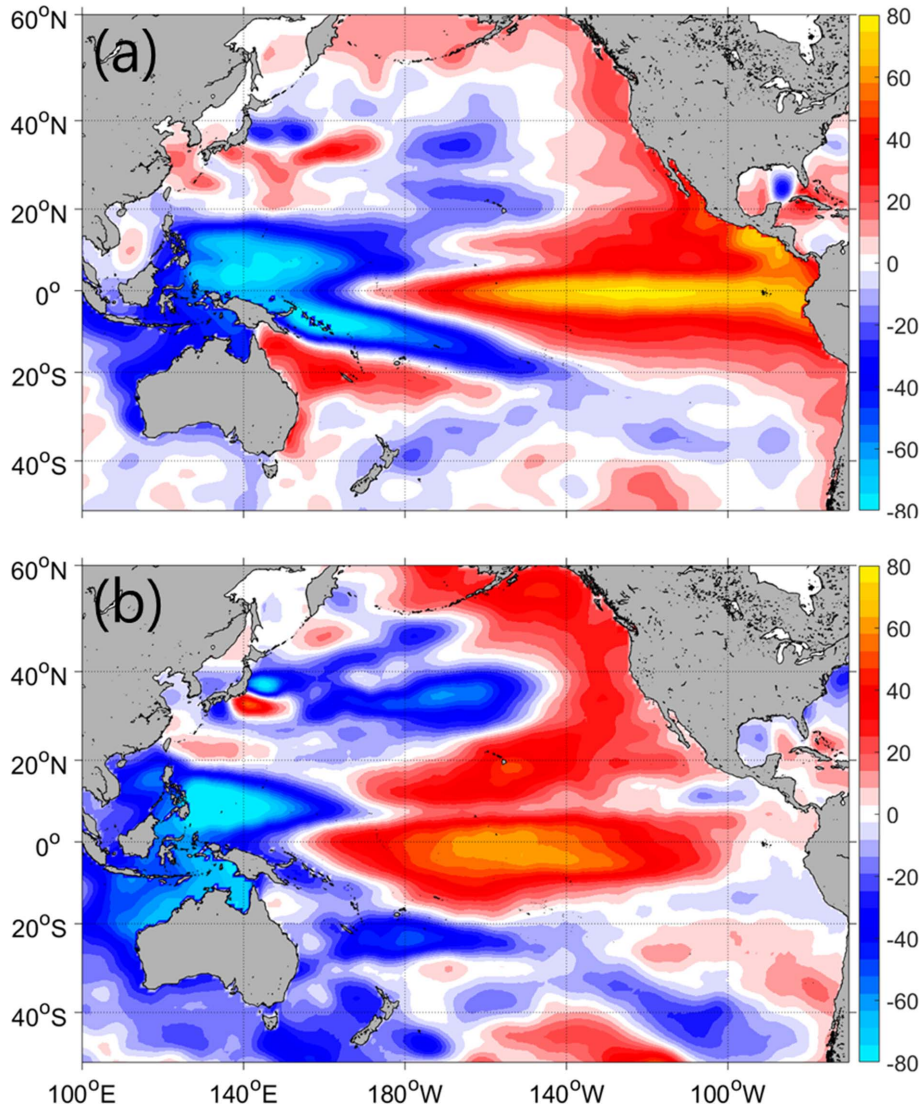


Fig. 3. (a) Inter-annual sea level fingerprint (unit : mm) and (b) decadal sea level fingerprint (unit : mm) over 1993–2012, represented by the regression of the sea level with respect to ICI (a_2 in Eq. (1)) and DCI (a_3 in Eq. (1)), derived from multiple variable linear regression

이 하강하는 분포를 보이는 반면 열대 동태평양은 +90 mm로 해수면이 상승하는 분포를 나타내면서 동서방향에서 서로 반대되는 뚜렷한 해수면 변동을 나타낸다. 이것은 ENSO와 관련된 무역풍의 경년 변동성과 밀접한 관련이 있다. 열대태평양해역에서 무역풍의 강화 혹은 약화에 의해 해양의 열과 질량수송이 발생하며, 그로 인해 해수면이 동서방향으로 크게 변동된다. 예를 들어, 1997년 엘니뇨 시기에 무역풍의 약화로 열대 서태평양의 평균해수면이 급격하게 낮아지는 반면 열대 동태평양의 경우 크게 상승한다(Fig. 5). 라니냐 시기에는 이와 반대되는 해수면 패턴을 나타낸다. 이와 같은 해수면의 지역적 패턴은 “tilting” 또는 “sea-saw” 모드라고 불리며 전형적인 엘니

뇨의 피크기간 동안 나타나는 공간분포와 일치한다(e.g., Zhang and Church 2012). DCI에 의한 해수면 변화(Fig. 3b)는 열대 서태평양에서 최소값을 열대 동태평양에서 최대값을 보이며 ICI에 의한 해수면 변화와 공간적으로 유사한 분포를 나타낸다. 하지만 ICI의 변동패턴과 비교해서 중앙 적도해역에서 남북방향으로 폭넓게 확장되고, 특히 북태평양에서 강한 변동성을 나타내는 특징을 보인다. 미국 서부연안을 따라 알래스카까지 해수면 상승패턴이 우세하지만 북태평양 중앙과 서부해역은 해수면 하강패턴을 나타내면서 ICI에서 나타나는 변동성과는 구분이 된다. PDO와 관련된 기후패턴은 북태평양에서의 대규모 바람패턴과 밀접한 관계가 있는데, PDO의 위상에 따라 북태평

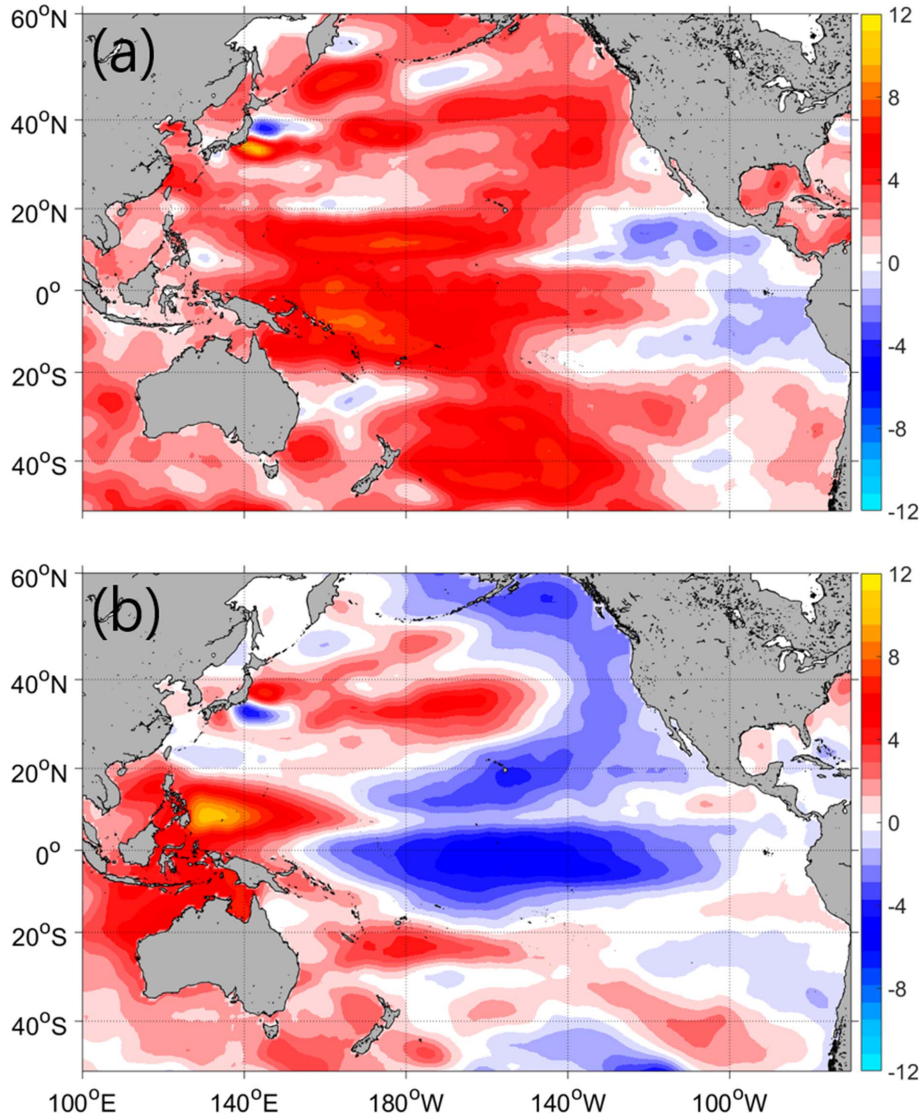


Fig. 4. (a) Sea level trend over 1993–2012 (a_1 in Eq. (1)) derived from multiple variable linear regression of sea level with respect to time, ICI and DCI. (b) Sea level trend over 1993–2012 due to climate variability (ICI and DCI) which results from the regression coefficient difference $c_1 - a_1$. All units are mm/yr

양 중앙해역에 시계방향 혹은 반 시계방향의 바람패턴이 발생하고 이로 인해 북태평양 중앙과 동쪽 연안에서 서로 반대되는 해수면 변동이 발생한다(e.g., Moon et al. 2013). 열대 및 북태평양의 지역 해수면 변동성에 영향을 주는 DCI에 의한 해수면 변동패턴은 SST 분포에서 나타나는 Eastern Pacific (EP) 엘니뇨보다는 Central Pacific (CP) 엘니뇨 공간분포와 닮았고(Kao and Yu 2009) SST EOF의 제 1모드인 PDO와도 유사한 공간분포를 나타낸다. 경년 변동과 장주기 변동에 나타나는 해수면 변동패턴의 차이는 ICI와 DCI의 변동성이 서로 밀접하게 관련되지 않음을 보여준다. Zhang and Church (2012)에 의하면 ICI와 DCI에 의한 해수면 변동패턴과 단주기와 장주기 해수면

변동성 EOF분석결과의 주성분 모드와 비슷한 분포를 보이는데, 이는 다변량 회귀모델로 유도된 해수면 변동패턴이 본질적으로 해수면 변동의 주요모드와 유사하다는 것을 나타낸다.

Fig. 4a는 다변량 회귀분석(식 (1))을 통해 추정된 해수면 상승률로 ICI와 DCI에 의한 변동성이 제거된 경향성을 나타낸다. 열대 동태평양 연안의 일부 해역을 제외하면 태평양 전역에 걸쳐 해수면 상승이 나타나는데, 이러한 분포는 단순회귀분석(Fig. 1)으로 나타난 공간패턴과 전반적으로 유사하다. 그러나 열대 동·서태평양과 북태평양 동쪽 연안에서 상승률의 차이가 뚜렷하게 나타난다. 이러한 지역적인 차이는 기후변동성에 의한 영향으로 발생하기 때

문에 기후변동성이 해수면 상승률에 얼마나 영향을 미쳤는지 확인하기 위해 단순회귀와 다변량회귀의 상승률의 차이($c_1 - a_1$)를 Fig. 4b에 나타냈다. 기후변동성에 의한 해수면 상승률은 열대 중앙 및 동태평양에서 강한 음의 상승률을 보이고 북태평양 중앙과 서쪽해역은 양의 상승률을 나타낸다. 이러한 패턴은 DCI에 의한 해수면 변동패턴과 많이 닮아 있는데 이는 지난 20년동안 장주기 변동성인 DCI가 하강하는 경향성을 나타내고 있기 때문이다. 실제로 DCI에 의한 해수면 상승률은 Fig. 4b와 거의 일치하는데 이는 결과적으로 위성기간 동안 DCI가 열대 서태평양과 북태평양 중앙해역의 해수면 상승과 열대 동태평양과 북태평양 동쪽연안의 해수면 하강에 상당한 기여를 했음을 알 수 있다.

DCI가 열대 태평양의 동부와 서부지역 해수면 경향성에 얼마나 기여했는지를 정량적으로 확인하기 위해 R1과 R2 지역(Fig. 1) 평균 해수면 변화와 DCI에 의한 변동성이 제거된 해수면 변화를 Fig. 5에 나타냈다. 1993–2012년 동안 열대 서태평양의 R1지역은 8.6 mm/yr의 상승률을 나타내지만 DCI에 의한 해수면 변화를 제거하였을 때는 3.1 mm/yr의 상승률을 보인다. 이것은 R1지역의 해수면 상승이 지난 20여년간 DCI의 경향성에 의해 더욱 가속화(5.5 mm/yr) 되었음을 의미한다. 반면에 열대 동태평양의 R2지역은 해수면 상승률이 -1 mm/yr을 보이지만

DCI에 의한 변화를 제거했을 때 오히려 상승하는 경향성(2.7 mm/yr)을 나타낸다. 이는 열대 서태평양과는 반대로 열대 동태평양에서는 DCI의 경향성에 의해 해수면 상승이 억제되었음을 의미한다. DCI는 열대 태평양 뿐만 아니라 북태평양의 전반적인 해수면 패턴에도 영향을 주는데, 위성관측기간 동안 북태평양 중앙해역에서는 높고, 동태평양 연안지역에서는 낮은 해수면 상승률에 기여했다. Bromirski et al. (2011)는 조위자료 분석을 근거로 최근 미국서부연안의 해수면 상승이 정체되거나 오히려 하강하는 경향성이 있음을 보고했는데, 이는 DCI에 의해 북동태평양 연안에서의 해수면 상승이 억제되는 결과와 일치한다.

재구성 자료 기간 동안 해수면 변화

위성관측기간(1993–2012년) 해수면 변화와 기후변동성 분석결과 DCI의 경향성에 의해 열대 서태평양 해수면 상승률이 가속화되었고 열대 동태평양의 해수면은 상승률이 억제된 특징을 보였다. 하지만 상대적으로 짧은 위성관측기간으로 인해 1993년 이전의 해수면 변동성 및 장주기 변동성을 파악하기에는 한계가 있다. 예를 들어, ICI와 DCI에 의한 해수면 변동성이 과거에는 어떠했으며, DCI에 의한 해수면 상승이 언제부터 시작되었는지에 대한 문제는 여전히 남아있다. 여기서는 위성관측기간 이전의 해

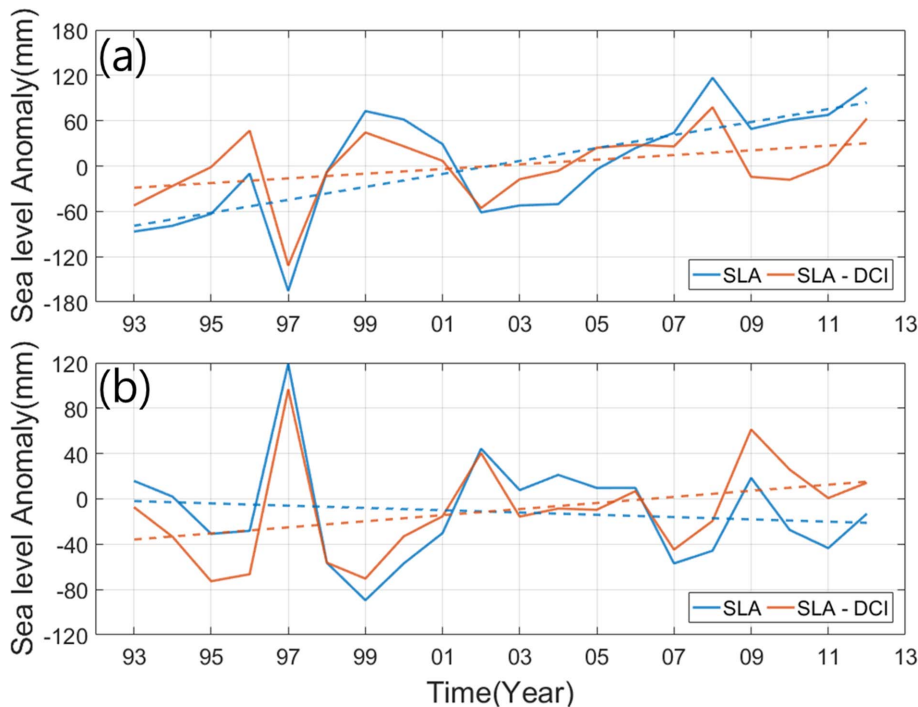


Fig. 5. (a) Time series of area-averaged sea level anomaly (blue) and its anomaly with the decadal variability removed (red) for the region of R1. (b) Same as (a), but for the region of R2. The linear trends of sea level are plotted as dashed line

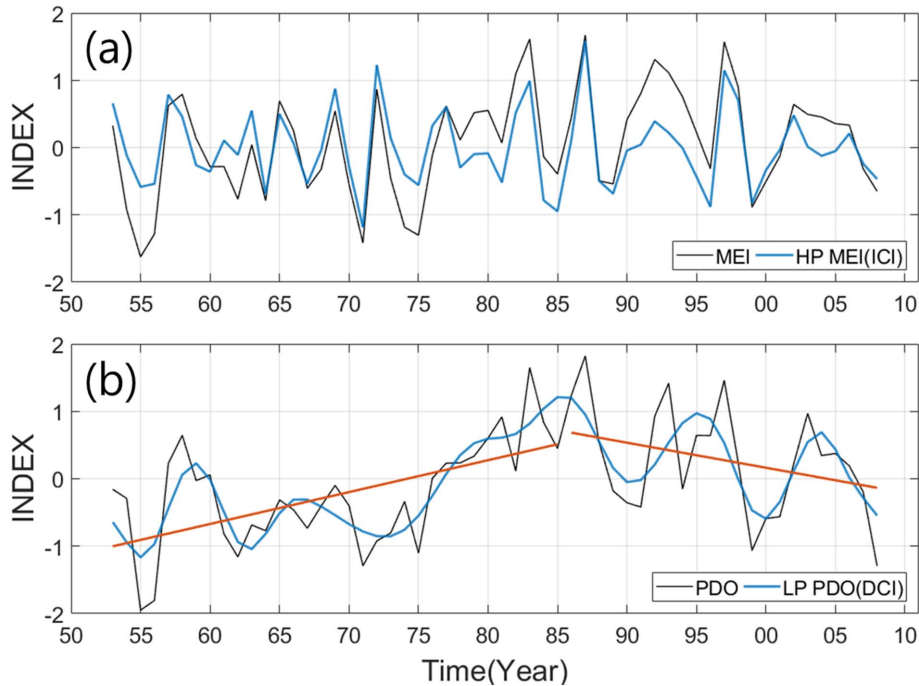


Fig. 6. (a) MEI index (black) and ICI (blue line), (b) PDO index (black) and DCI (blue line) over 1953–2008. The linear trend of DCI is plotted as red line

수면 변화와 기후변동성과의 연관성을 확인하기 위해 과거 60년 기간의 해수면 재구성 자료를 사용하여 위성기간과 같은 방법으로 분석하였다. 이전장과 같은 방법으로 재구성 자료 기간(1953–2008년) 동안에 ICI와 DCI를 정의하였고, 그 결과를 Fig. 6에 제시하였다. 흥미로운 점은 DCI의 경향성이 1980년대 중반을 전후로 그 경향성이 바뀌는 특징을 보인다는 점이다(Fig. 6b). 1980년대 중반 이전에는 DCI가 상승하는 경향성을 보였고 그 이후에는 위성기간과 같은 하강하는 경향성이 나타났다. 따라서, 여기서는 DCI의 경향성이 반대로 나타나는 1980년대 중반을 전후로 기후변동성과 해수면 사이의 관계를 분석하였다.

위성기간과 같은 회귀분석방법을 적용하여 1953–1985년과 1986–2008년의 두 기간 동안 ICI와 DCI에 의한 해수면 변동성 및 그와 관련된 해수면 상승을 분석하였다. ICI와 DCI에 의한 해수면 변동성은 1980년대 중반 이전보다 이후기간에서 약간 더 강하게 나타나는 특징을 보이지만 전반적인 변동패턴은 위성기간 동안의 결과와 거의 유사하다(Fig. 3의 결과와 유사하기 때문에 제시하지 않았음). 이전 장에서 설명한 것처럼 ICI에 의한 해수면 변동은 열대 태평양 적도를 중심으로 ENSO와 관련된 동서방향의 “sea-saw” 모드가 지배적인 반면 DCI에 의한 해수면 변동은 ICI의 변동패턴과 비교해서 중앙 적도해역에서 남북방향으로 폭넓게 확장하고 북태평양에서 보다 강한 변동성을 나타낸다. 이것은 지난 60년 간 열대해역의 강한

ENSO의 경년 변동성과 PDO와 관련된 십 년 주기의 장주기 변동성이 중첩되면서 태평양의 동쪽과 서쪽해역의 해수면이 변동하는 것을 의미한다.

Fig. 7a는 1953–1985년 기간 동안 회귀분석을 통해 나타난 DCI에 의한 해수면 상승을 보여준다. DCI는 열대 서태평양의 해수면 하강과 열대 동태평양 및 미국서부연안의 해수면 상승에 크게 기여했는데, 이러한 해수면 상승 패턴은 위성기간 동안에 나타난 DCI에 의한 해수면 경향성과 거의 반대되는 모습이다. 이는 위성기간 나타난 하강하는 DCI 경향성과 반대로 1953년부터 1985년까지 지속적으로 상승하는 DCI 경향성과 관련 있다. Fig. 8은 열대 태평양에서 R1 해역과 R2 해역의 평균 해수면 변화와 DCI에 의한 해수면 변동이 제거된 해수면 변화를 나타낸다. 열대 서태평양(R1)의 평균 해수면 상승은 약 2.3 mm/yr로 위성기간과 비교해서 매우 약하게 나타나지만, DCI에 의한 해수면 변화가 제거되었을 때는 4.1 mm/yr로 약 2배 정도 빠르게 상승률이 증가했다. 반면에 0.4 mm/yr의 상승률을 보이는 열대 동태평양(R2)은 DCI에 의한 해수면 변화가 제거되었을 때 -1.0 mm/yr로 상승률이 감소하는 결과가 나타났다. 이러한 결과는 1980년대 중반 이전에는 DCI에 의해 열대 서태평양과 북태평양 중앙-서쪽해역에서 해수면 상승이 억제되었던 반면, 열대 동태평양과 북태평양 동쪽연안을 따라서는 해수면 상승이 가속화 되었음을 나타낸다. Merrifield (2011)는 열대 서태평양에서

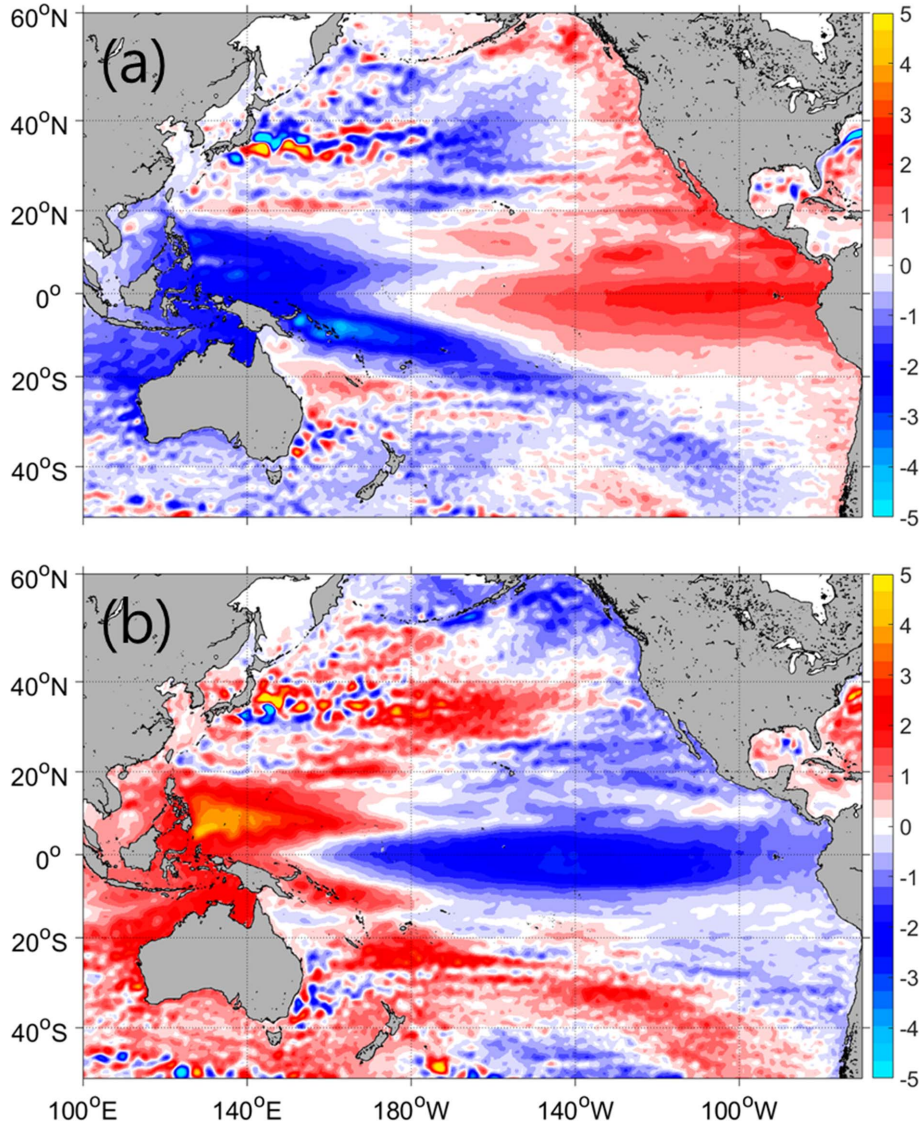


Fig. 7. Sea level trends due to DCI over 1953–1985 (a) and 1986–2008 (b), which result from the regression coefficient $c_1 - b_1$. All units are mm/yr

1950년부터 2009년까지의 장기간 조위자료를 분석하여, 1980년대 중반 이전에는 열대 서태평양에서 해수면 상승이 거의 정체되었거나 혹은 약하게 상승했음을 보고했는데, 이것은 본 연구에서 1953–1985년 동안 나타난 열대 서태평양의 약한 해수면 상승과 일치한다. 결과적으로 1980년대 중반 이전 열대 서태평양의 느린 해수면 상승률은 DCI의 장기 경향성에 의해 해수면 상승이 억제되면서 나타났음을 나타낸다.

Fig. 7b는 1986년부터 2008년까지 DCI에 의한 해수면 상승의 공간분포를 나타낸다. DCI는 열대 서태평양과 북태평양 중앙해역의 해수면 상승과 열대 동태평양과 북태평양 동쪽연안의 해수면 하강에 크게 기여하는 결과를 나타내며, 이러한 해수면 상승은 1953년부터 1985년까지 나

타난 DCI에 의한 해수면 상승경향과 정확히 반대되는 패턴이다. 또한, DCI에 의한 해수면 상승률은 위성기간 동안 나타난 해수면 경향성과도 일치하는 패턴을 보이는데, 이것은 1980년대 중반 이후 DCI의 하강하는 경향성과 연관성이 있다(Fig. 6b). DCI에 의한 해수면 변동이 열대 서태평양과 열대 동태평양 해수면 상승에 얼마나 영향을 미쳤는지를 파악하기 위해 Fig. 9에 R1과 R2지역에 대한 평균 해수면 변화와 DCI에 의한 해수면 경향이 제거된 해수면 변화를 제시했다. 열대 서태평양의 R1 해역은 6.0 mm/yr로 해수면이 급격하게 상승하고 있는 반면, 열대 동태평양의 R2 해역은 -1.3 mm/yr로 해수면이 하강하는 모습을 보이면서 두 해역의 상승률 차이가 두드러진다. 하지만, DCI에 의한 해수면 변동을 제거했을 때 R1 해역에서 3.4 mm/

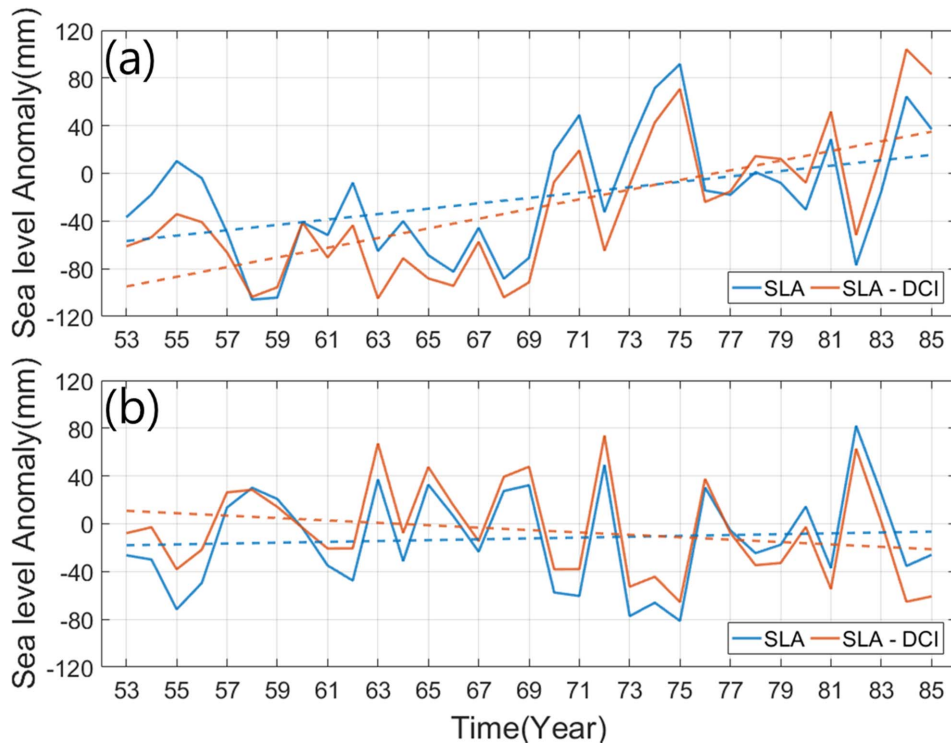


Fig. 8. (a) Time series of area-averaged sea level anomaly (blue) and its anomaly with the decadal variability removed (red) for the region of R1 over 1953–1985. (b) Same as (a), but for the region of R2. The linear trends of sea level are plotted as dashed line

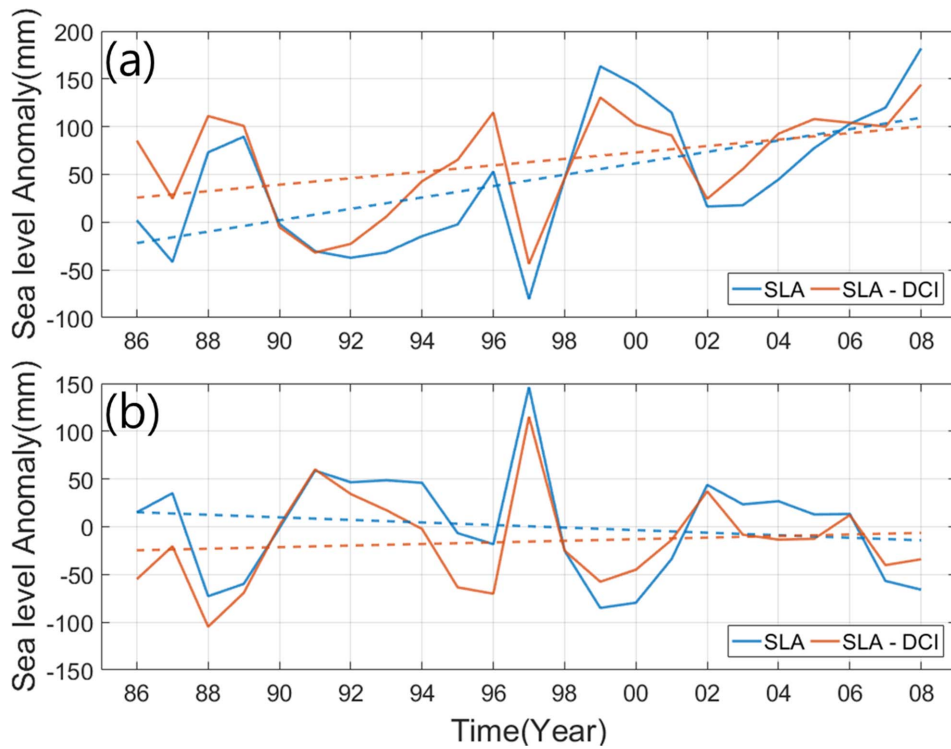


Fig. 9. Same as Fig. 8, but for the period of 1986–2008

yr의 상승률을 나타내는 반면, R2 해역에서는 0.8 mm/yr을 보이면서 두 해역의 해수면 상승의 경사가 완만해졌음을 알 수 있다. 다시 말해, DCI는 1980년대 중반 이후 열대 서태평양의 급격한 해수면 상승과 동태평양에서 정체되거나 낮아지는 해수면 변화에 기여했음을 의미한다.

위성 자료를 사용한 최근 해수면 상승에 대한 여러 연구들은 지난 20년간 열대 서태평양에서 해수면이 상승하고 열대 동태평양에서 정체되거나 오히려 하강하는 지역적인 차이를 보고했지만(Cazenave and Llovel 2010; Bromirski et al. 2011; Zhang and Church 2012), 위성 자료의 짧은 관측기간으로 인해 태평양에서의 해수면 상승과 기후변동성과의 관계를 분석하는데 제약이 있었다. 과거 60년간 해수면 재구성 자료를 사용한 본 연구 결과는 위성 관측이 가능해진 1990년대 초반 이전인 1980년대 중반을 전후로 하여 장주기 기후변동성과 관련된 해수면 상승의 큰 변화(shift)를 겪었음을 보여준다. 결과적으로 최근에 나타난 열대 태평양에서 높고 동태평양에서 정체되거나 낮은 해수면 상승패턴은 적어도 1980년대 중반 이후부터 시작되었음을 확인할 수 있다.

4. 요약 및 결론

기존의 많은 연구들은 해수면 변화가 공간적으로 균일하지 않으며 지역적으로 편차가 뚜렷함을 보였다. 특히, 태평양은 지구상에서 해수면 상승의 지역적인 편차가 가장 두드러진 해역으로 지구온난화로 인한 인위적인 해수면 상승과 ENSO, PDO와 같은 자연적인 기후변동성이 중첩되어 나타나는 것으로 알려져 있다(e.g., Merrifield et al. 2012; Zhang and Church 2012). 기후변동성은 다양한 시간규모의 변동성을 가지기 때문에 지역해수면의 급격한 변화와 지구온난화에 의한 해수면 상승을 정확하게 진단하는데 어려움이 있다. 최근 들어 해수면자료로부터 자연 변동성, 특히 ENSO와 PDO와 관련된 변동성을 분리하려는 다양한 시도가 이루어지고 있다(e.g., Lee and McPhaden 2008; Bromirski et al. 2011; Church et al. 2010). 위성 자료는 해수면 연구에 있어 가장 많이 사용되고 있는 자료 중에 하나로 거의 전 지구를 커버하기 때문에 공간적인 해수면 변동 및 상승에 대한 신뢰할 만한 정보를 제공할 수 있다. 그러나 Zhang and Church (2012)에서 지적한 것처럼 관측기간이 짧은 위성 자료는 경년 변동성 이외의 장주기 변동성에 대한 분석에는 제한이 따른다. 장기간 해수면 상승에 대한 기존의 연구는 주로 조위자료를 사용하여 분석해왔는데, 조위자료는 공간적인 해상도에 제약이 따르기 때문에 지역적인 해수면 변화와 각 지역과의 연관성을 파악하는데 한계가 있었다. 최근에는 위성자료와 조위자료의 단점을 보완하기 위해 두 자료를 결합한 해수면

재구성 자료에 대한 연구가 시도되고 있다(e.g., Hamlington et al. 2011; Meyssignac et al. 2012). 따라서 본 연구에서는 최근 20년간(1993–2012년)의 위성 자료와 장기간 과거 해수면 재구성 자료(1953–2008년)를 사용하여 태평양에서 지역적인 해수면 상승이 어떻게 변화되어왔고 태평양의 기후변동성과는 어떤 연관성이 있는지를 확인하였다. 특히, ENSO, PDO와 관련된 기후변동성과 중·장기 해수면 변동성 그리고 장기간 해수면 상승에 대한 연관성을 정량적으로 분석 및 평가하였다. 이를 위해 태평양에서의 지역 해수면 변화로부터 경년 기후변동성 및 장주기 기후변동성과 관련된 해수면 변동을 분리하기 위해 Zhang and Church (2012)에서 사용한 다변량 회귀분석을 적용하였다. 태평양에서의 경년 기후변동성(ICI)과 장주기 기후변동성(DCI)은 MEI와 PDO 지수를 사용하여 정의하였으며, ICI와 DCI는 각각 ENSO의 경년 변동성과 PDO의 장주기 변동성을 나타내는 지수로 사용되었다.

기후변동성이 지역적인 해수면에 어떤 영향을 주는지 알아보기 위해, 우선 다변량 회귀분석으로부터 ICI와 DCI에 대한 공간적인 해수면 변동패턴을 확인하였다. ICI에 대한 회귀계수 분포는 열대 동태평양과 서태평양이 서로 반대가 되는 ENSO에 의한 강한 경년 변동성이 지배하는 특징을 보인다. 반면에, DCI에 대한 해수면 변동은 열대 태평양 해역에서 ICI와 유사한 변동패턴을 보이지만 남북 방향으로 보다 폭넓은 지역 해수면에 영향을 미친다. 특히 북태평양에서 상대적으로 강한 변동성을 나타내면서 ICI와는 구별되는 모습을 보인다. 이들 기후변동성이 해수면 상승에 얼마나 기여했는지를 알아보기 위해 단순회귀분석과 다변량 회귀분석을 사용하여 해수면 자료로부터 ICI와 DCI에 의한 해수면 상승률을 분리하였다. 위성기간 동안 ICI와 DCI는 태평양의 지역적인 해수면 분포에 영향을 주었으며 DCI의 경우는 열대 서태평양에서의 지속적인 해수면 상승과 열대 동태평양에서의 해수면 하강에 크게 기여했다. 이러한 결과는 DCI가 지난 20년간 지속적으로 하강하는 경향성을 가지기 때문이다. 이들 기후변동성에 의한 지역적 해수면 변동과 그와 관련된 해수면 경향성의 변화는 장기간 해수면 재구성 자료(1953–2008년)에서도 분명하게 나타난다. ICI에 의한 해수면 변동은 1980년대 중반 전과 후 모두 ENSO의 경년 변동과 관련된 “sea-saw” 모드를 나타내는 동서방향의 해수면 변동을 나타내며, 이는 위성자료를 사용한 결과와 동일한 경년 변동성을 나타낸다. DCI에 의한 공간적인 변동성 또한 위성기간 동안의 결과와 일치한다. 그러나, DCI에 의해 야기되는 해수면 경향성은 위성 자료에서는 확인할 수 없었던 장주기 변동성의 변화를 드러낸다. DCI는 1980년대 중반 이전에는 상승하는 경향이, 그 이후에는 하강하는 경향을 보임으로써 1980년대 중반을 전후로 DCI의 경향성이 급격히 바

뀌었음을 알 수 있다. 이러한 DCI의 장주기 변동성은 1980년대 중반 이전에는 열대 서태평양 해수면의 하강과 열대 동태평양 해수면의 상승에 기여하지만, 그 이후에는 이전과는 반대되는 해수면 상승패턴을 나타낸다. 이는 최근 위성관측에서 나타난 태평양에서의 지역적인 상승패턴이 장주기 기후변동성에 영향을 받아 1980년대 중반 이후부터 바뀌었음을 의미한다.

이 연구결과는 기후변동성, 특히 PDO와 관련된 장주기 변동성이 태평양 해수면의 상승이나 하강에 크게 기여하고 있음을 보여준다. 인류에 직접적인 위협을 가하고 있는 미래 해수면 변화를 예측하는데 있어 자연변동성에 기인하는 해수면 변화를 평가하는 것은 매우 중요한 일이다. 예를 들어, 향후 PDO의 장주기 변동성 변화로 인해 최근의 해수면 상승분포와는 달리 열대 서태평양의 상승률이 약화되는 반면 동태평양 연안의 해수면이 급격하게 상승하는 변화를 겪게 될 지도 모른다. 이와 더불어 해수면 변화를 예측하기 위해서는 기후변동성과 해수면 변화, 그리고 그들의 역학적 상호작용에 대한 이해가 요구된다. 본 연구에서는 다변량 회귀분석을 사용하여 태평양에서의 기후변동성과 해수면 변화와의 연관성을 분석하였지만 회귀분석과 같은 통계적인 방법은 기후변동성과 해양의 역학적인 반응을 설명하기에는 한계가 있다. 따라서 향후 자료 분석 및 역학모델을 활용하여 기후변동성과 해수면과의 관계 및 그 역학적인 기작에 대한 연구가 요구된다.

사 사

이 논문은 2017학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- Bromirski PD, Miller AJ, Flick RE, Auad G (2011) Dynamical suppression of sea level rise along the Pacific coast of North America: indications for imminent acceleration. *J Geophys Res* **116**:C07005
- Cazenave A, Llovel W (2010) Contemporary sea level rise. *Annu Rev Mar Sci* **2**:145–173
- Chambers DP, Mehlhaff CA, Urban TJ, Fujii D, Nerem RS (2002) Low-frequency variations in global mean sea level: 1950–2000. *J Geophys Res* **107**(C4):1-1–1-10. doi:10.1029/2001JC001089
- Church, JA, White NJ, Coleman R, Lambeck K, Mitrovica JX (2004) Estimates of the regional distribution of sea level rise over the 1950–2000 period. *J Climate* **17**(13): 2609–2625
- Church JA, Aarup T, Woodworth PL, Wilson WS (2010) Synthesis and outlook for the future. In: Church JA, Aarup T, Woodworth PL, Wilson WS, Nicholls RJ, Rayner R, Blewitt G (eds) *Understanding sea-level rise and variability*. Blackwell, London, pp 402–419
- Church JA, White NJ (2011) Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surv Geophys* **32**(4–5): 585–602
- IPCC (2013) *Climate change 2013*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.climatechange2013.org/report/full-report/> Accessed 5 May 2017
- Deser C, Alexander MA, Xie SP, Phillips AS (2010) Sea surface temperature variability: patterns and mechanisms. *Annu Rev of Marine Sci* **2**:115–143
- Di Lorenzo E, Liguori G, Schneider N, Furtado JC, Anderson BT, Alexander MA (2015) ENSO and meridional modes: a null hypothesis for Pacific climate variability. *Geophys Res Lett* **42**(21):9440–9448
- Gershunov A, Barnett TP (1998) Interdecadal modulation of ENSO teleconnections. *B Am Meteorol Soc* **79**(12):2715–2725
- Hamlington BD, Leben RR, Nerem RS, Han W, Kim KY (2011) Reconstructing sea level using cyclostationary empirical orthogonal functions. *J Geophys Res* **116**: C12015
- Hamlington BD, Strassburg MW, Leben RR, Han W, Nerem RS, Kim KY (2014) Uncovering an anthropogenic sea-level rise signal in the Pacific Ocean. *Nat Clim Change* **4**(9):782
- Hay CC, Morrow E, Kopp RE, Mitrovica JX (2015) Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise. *Nature* **517**(7535):481–484
- Kao HY, Yu JY (2009) Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO. *J Climate* **22**(3):615–632
- Landerer FW, Jungclaus JH, Marotzke J (2008) El Niño–Southern Oscillation signals in sea level, surface mass redistribution, and degree-two geoid coefficients. *J Geophys Res* **113**:C08014. doi:10.1029/2008JC004767
- Lee T, McPhaden MJ (2008) Decadal phase change in large-scale sea level and winds in the Indo-Pacific region at the end of the 20th century. *Geophys Res Lett* **35**:L01605
- Llovel W, Cazenave A, Rogel P, Lombard A, Nguyen MB (2009) Two-dimensional reconstruction of past sea level (1950–2003) from tide gauge data and an ocean general circulation model. *Clim Past* **5**(2):217–227
- Mantua NJ, Hare SR, Zhang Y, Wallace JM, Francis RC (1997) A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *B Am Meteorol Soc* **78**(6):1069–1079

- Masters D, Nerem RS, Choe C, Leuliette E, Beckley B, White N, Ablain M (2012) Comparison of global mean sea level time series from TOPEX/Poseidon, Jason-1, and Jason-2. *Mar Geod* **35**(sup1):20–41
- Merrifield MA (2011) A shift in western tropical Pacific sea level trends during the 1990s. *J Climate* **24**(15):4126–4138
- Merrifield MA, Thompson PR, Lander M (2012) Multidecadal sea level anomalies and trends in the western tropical Pacific. *Geophys Res Lett* **39**:L13602. doi:10.1029/2012GL052032
- Meyssignac B, Becker M, Llovel W, Cazenave A (2012) An assessment of two-dimensional past sea level reconstructions over 1950–2009 based on tide-gauge data and different input sea level grids. *Surv Geophys* **33**(5):945–972
- Moon JH, Song YT, Bromirski PD, Miller AJ (2013) Multidecadal regional sea level shifts in the Pacific over 1958–2008. *J Geophys Res* **118**(12):7024–7035
- Moon JH, Song YT, Lee H (2015) PDO and ENSO modulations intensified decadal sea level variability in the tropical Pacific. *J Geophys Res* **120**(12):8229–8237
- Nerem RS, Chambers DP, Leuliette EW, Mitchum GT, Giese BS (1999) Variations in global mean sea level associated with the 1997–1998 ENSO event: implications for measuring long term sea level change. *Geophys Res Lett* **26**(19):3005–3008
- Newman M, Compo GP, Alexander MA (2003) ENSO-forced variability of the Pacific decadal oscillation. *J Climate* **16**(23):3853–3857
- Newman M, Alexander MA, Ault TR, Cobb KM, Deser C, Di Lorenzo E, Schneider N (2016) The Pacific decadal oscillation, revisited. *J Climate* **29**(12):4399–4427
- Schneider N, Cornuelle BD (2005) The forcing of the Pacific decadal oscillation. *J Climate* **18**(21):4355–4373
- Yeo SR, Kim KY (2014) Global warming, low-frequency variability, and biennial oscillation: an attempt to understand the physical mechanisms driving major ENSO events. *Clim Dynam* **43**(3–4):771–786
- Zhang X, Church JA (2012) Sea level trends, interannual and decadal variability in the Pacific Ocean. *Geophys Res Lett* **39**:L21701. doi:10.1029/2012GL053240

Received Aug. 16, 2017

Revised Jan. 30, 2018

Accepted Feb. 5, 2018