

Article

<https://doi.org/10.7850/jkso.2018.23.2.063>  
pISSN : 1226-2978

## 분위회귀를 이용한 한반도 연안 해면 고도의 장주기 선형 추세 분석

임병준 · 장유순\*

공주대학교 지구과학교육과

# Analysis of Long-term Linear Trends of the Sea Surface Height Along the Korean Coast based on Quantile Regression

BYEONG-JUN LIM AND YOU-SOON CHANG\*

Department of Earth Science Education, Kongju National University, Chungnam 32588, Korea

\*Corresponding author: [yschang@kongju.ac.kr](mailto:yschang@kongju.ac.kr)

Editor Choi Byeong-ju

Received 27 December 2017; Revised 9 March 2018; Accepted 3 April 2018

### ABSTRACT

본 연구에서는 분위회귀를 이용하여 1993~2016년 동안의 한반도 조위 자료의 장주기 선형 추세를 분석하였다. 일반 선형회귀(OLS: Ordinary Least Square)와 50% 중간 분위 회귀 결과를 비교했을 때 특히 황해에서 약 2~3 mm/year의 회귀 결과의 차이를 발견하였으며, 이는 극한 값 변화에 기인함을 확인할 수 있었다. 또한 해역별로 하위(1%) 분위와 중간(50%) 분위, 상위(99%) 분위의 값이 모두 다르게 나타났다. 황해의 대부분 지역에서는 상위 분위와 하위 분위가 모두 증가하는 경향을 나타냈으나, 유의미한 “상향 발산형” 회귀 결과를 보였다. 이는 상위 분위가 중간 분위에 비해 유의미하게 크게 나타나는 경향을 의미한다. 대한민국 남해안에서는 상위 분위가 하위 분위보다 더 작은 증가 값을 가지는 “상향 수렴형” 회귀 결과가 특징적으로 나타났다. 이러한 경향은 조화 분석을 통해 알려진 조석 분조들을 제거한 결과에서는 없어지는 것을 확인하였다. 그러므로 분위 회귀의 지역적 특성은 조석 세기의 장주기 변동과 연관이 있다고 추측된다.

This study analyzed the long-term linear trends of the sea surface height around the Korea marginal seas for the period of 1993~2016 by using quantile regression. We found significant difference about 2~3 mm/year for the linear trend between OLS (ordinary least square) and median (50%) quantile regression especially in the Yellow Sea, which is affected by extreme events. Each area shows different trend for each quantile (lower (1%), median (50%) and upper (99%)). Most areas of the Yellow Sea show increasing trend in both low and upper quantile, but significant “upward divergence tendency”. This implies that significant increasing trend of upper quantile is higher than that of lower quantile in this area. Meanwhile, South Sea of Korea generally shows “upward convergence tendency” representing that increasing trend of upper quantile is lower than that of lower quantile. This study also confirmed that these tendencies can be eliminated by removing major tidal components from the harmonic analysis. Therefore, it is assumed that the regional characteristics are related to the long term change of tide amplitude.

**Keywords:** Linear trend, Sea surface height, Quantile regression, Korean marginal seas

## 1. 서론

해수면은 조석, 기압, 풍향, 풍속, 강수 및 담수 유입의 변화뿐 아니라 수온, 염분 및 해류의 변화 등 해양과 대기의 다양한 시공간 변동에 의해 복합적으로 반응한다. 정부간 기후변화 협의체(Intergovernmental Panel for Climate Change, IPCC)는 전지구 평균 해수면은 1901~2010년 동안 0.19(0.17~0.21) m이 상승했으며, 이러한 해수면의 증가 경향은 향후 더욱 뚜렷하게 나타날 것이라 예측하고 있다(IPCC, 2013). 이러한 해면 고도 상승이 지속된다면 저지대에 있는 연안이나 도서 지역에 악영향을 미칠 수 있다. 특히, 우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있으며 연안에서 도시 개발이 활발하고 인구가 밀집되어 있

어 해수면 변동으로 인한 위험도가 높아 관련 연구 및 정책 결정에 대한 중요성이 높아지고 있다.

해수면의 장주기 변동은 대부분의 연구에서 선형 회귀 방법(Ordinary Least Square, OLS)을 이용하여 정량화하여 연구하고 있다. 국립해양조사원(Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, KHOA)에서는 매년 우리나라 평균 해수면 상승률에 대해 분석하여 발표한다. 2011년까지의 자료를 이용한 평균 해수면 상승률은 2.37 mm/year이며, 해역 별 상승률은 대한민국 남해안에서 3.00 mm/year, 동해에서 2.08 mm/year, 황해에서 1.32 mm/year로 남해안에서 해수면 상승이 가장 크며, 특히 제주도 해역은 5.14 mm/year로 매우 크게 나타난다고 발표했다(KHOA, 2012). Lim and Chang (2016)에서는 다양한 회귀 기간의 검조소 별 해수면 변동을 체계적으로 분석하였으며, 분석 기간에 따라 정량적인 해수면 상승률이 모두 다르기 때문에 선형 회귀 도표를 개발하여 발표하였다. 또한 많은 연구들이 검조소 자료뿐만 아니라 원격 탐사 자료를 이용하여 다양한 분석을 실시하고 있으며, 그 결과 해수면 상승 경향은 비교적 동일하나 그 정도가 해역 별로 뚜렷한 차이가 있다고 밝혔다(Yoon *et al.*, 1999; Kang *et al.*, 2005; Jeon, 2008; Oh *et al.*, 2012; Yoon and Kim, 2012; Jung, 2014).

그러나 선형 회귀 방법은 자료가 선형적으로 분포한다는 가정을 하고 있어 결과값이 자료를 유의미하게 대표하지 못하며(Barbosa *et al.*, 2004; Jevrejeva *et al.*, 2006; Holgate, 2007), 모든 자료에 대한 평균 회귀 직선의 기울기에 대한 정보만을 제공한다. 그러므로 평균적인 변화보다 더 중요하게 여겨질 수 있는 자료의 극한 값들의 변동 값에 대한 정보를 전혀 알 수 없다는 단점이 있다(Barbosa, 2008). 최근 다양한 연구에서 전지구적으로 극한 해양 기상 현상의 발생 빈도가 증가하고 있으며, 21세기 후반에는 그 증가 가능성이 더욱 높다고 예측되고 있다(IPCC, 2013). 그러므로 해면 고도의 장주기 변동 특성 연구에서도 평균적인 변화뿐만 아니라 자료의 전체 범위에서 경향성을 포괄적으로 평가할 수 있는 방법이 필요하다.

일반적인 선형 회귀 방법의 대안으로는 시계열 자료의 다양한 분위에서의 선형 경향성을 한눈에 비교할 수 있는 분위 회귀 방법(quantile regression method)이 있다. 분위 회귀 방법은 자료의 평균치가 아닌 자료 분포의 모든 분위에 대한 변동성을 계산할 수 있으며, 극단의 이상치에 의한 회귀 결과가 크게 달라지는 단점을 제거할 수 있다는 장점이 있다(Koenker and Basset, 1978; Hao and Niamn, 2007). 이러한 분위 회귀 분석 방법은 경제학, 생물측정학, 인체측정학 등 사회 통계학 연구에서 주로 이용되었으나(Buchinsky, 1994; Cade and Noon, 2003), 최근에는 전지구 평균 기온, 태풍 강도 및 극지역 해빙 면적 변화 등의 기후 변화 및 응용 연구에서도 활발히 활용되고 있다(Elsner *et al.*, 2008; Jagger and Elsner, 2009; Mazvimavi, 2010; Tareghian and Rasmussen, 2012). 국내 연구로는 한반도 강수량 변화의 분위 별 변동을 분석한 연구가 있으며, 모두 최근 상위 분위 강수의 강도가 증가하고 있음을 효율적으로 제시하고 있다(Lee *et al.*, 2012; So *et al.*, 2012). 그러나 분위 회귀 분석 방법이 해수면, 수온, 염분 등의 해양 자료에 적용된 예는 아직까지 많지 않은 편이다. 해수면 변동 관련해서 Barbosa (2008)은 발트해에 존재하는 12개 검조소 자료의 분위 회귀 분석을 실시하여 장주기 변동성을 분석하였으며, Barbosa and Madsen (2012)는 Gedser, Hornbaek 지역의 검조소 자료를 분위 회귀 방법을 이용한 분석 결과를 제시하였다. 국내에서는 유일하게 MK (Mann-Kendall) 검정 및 분위 회귀 분석을 이용한 우리나라 연안 해수면 자료의 경향성 평가에 관한 연구가 존재하지만, 결과에 대한 역학적 설명이 부족하며, 사용된 조위 자료의 분석 기간이 서로 동일하지 않다(Uranchimeg *et al.*, 2015). 회귀 결과는 사용한 자료 기간에 따라 그 결과 값이 다르게 나타날 수 있어 기간이 다른 자료를 이용한 회귀 결과는 상호 비교가 어렵다는 한계가 존재한다(Barbosa and Madsen, 2012; Lim and Chang, 2016). 이에 본 연구에서는 한반도 연안에 위치한 18개 검조소의 1993~2016년까지의 동일한 기간 자료를 이용하여 분위 회귀 분석을 실시하였다. 조위 자료의 빈도 분포 함수 분석을 우선 실시하여 자료의 분포 양상 및 극한 값의 분포를 확인하였으며 조위 자료에 대해 기존 선형 회귀 분석과 모든 분위에 대한 분위 회귀 분석을 실시하여 그 차이 및 특징을 분석하였다. 결과로 분위 별 변화 양상을 한눈에 볼 수 있는 process diagram을 이용하여 18개 검조소의 분위 별 특징을 확인하고 제시하였다.

## 2. 자료 및 방법

본 연구에서는 국립해양조사원에서 운영하여 제공하는 1993년부터 2016년의 총 24년 기간의 매 시간 단위의 검조소 자료를 사용하였다. 검조소의 조위 자료는 결측 구간이 짧게는 몇 시간에서부터 길게는 1년 넘게 존재한다. 따라서 선형 추세의 신뢰도를 확보하기 위하여 관측 자료의 품질이 의심되는 과거 자료의 사용을 최소화하고, 결측 구간이 총 24년 중 1년 이하로 나타나는 지점의 자료만을 사용하였다. 동해는 울산, 포항, 묵호, 속초, 울릉도, 대한민국 남해안에서는 추자도, 완도, 여수, 통영, 가덕도, 부산, 제주, 서귀포, 거문도, 황해는 안흥, 군산, 흑산도, 목포의 총 18개 지점의 조위 자료를 사용하였다(Fig. 1).

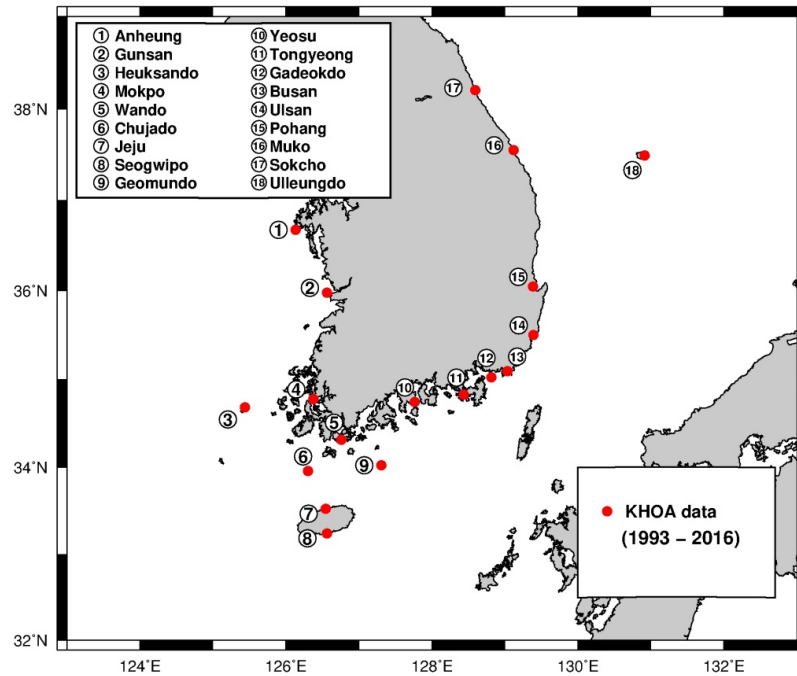


Fig. 1. Locations of tide gauge data used in this study.

본 연구에서 사용된 조위 자료는 국립 해양 조사원에서 기압 보정 등의 1차 품질 과정을 거친 자료이다. 동일한 종류의 자료를 사용하여 해면 고도의 장주기 선형 변동 값을 제시한 Lim and Chang (2016)의 선형 연구에서는 폭풍 해일이나 이상 파랑 등과 같은 단기적인 해수면 변화에 의한 영향을 줄이기 위해 표준 편차의 3배 이상 값을 제거하는 품질 관리 과정을 추가로 실시하였다. 또한 월평균 값을 계산하는 과정에서 6시간 이하의 결측 구간이 있는 자료에 대해서만 내삽을 실시하였고, 평균 계산 시 15일 이상의 결측 구간이 있는 경우는 제외하였다(IOC, 1985). KHOA (2015)에서는 단기 이상 해면 변동뿐만 아니라 연안 개발이나 지반 침하와 같은 지면 변동에 의한 해수면 변화를 추가로 고려한 해수면 변동을 분석하였다. 그 결과 단기 해면 이상 구간의 제거는 장주기 해수면 상승률에 큰 영향이 없다고 발표하고 있으며, 목포, 포항, 제주의 경우 연안 개발 등 인위적 요인이 해수면의 장주기 변동 계산에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

본 연구의 목적은 폭풍 해일이나 이상 파랑 등과 같은 단기적인 해수면 변화에 의한 극한 해양 기상의 변동까지 포함한 분위 회귀식을 도출하는 것이기 때문에, 기존 연구에서 공통적으로 적용하였던 이상 편차 값을 제거하는 엄격한 품질 관리 방법을 적용하지 않았다. 또한 연안 개발 사업이 지속적이고 복합적으로 시행되어 해수면 변화에 영향을 미치는 개발 사업들

정량적으로 특정하는 것이 현실적으로 매우 어렵기 때문에(KHOA, 2015), 이 부분의 품질 관리 과정을 생략하였다. 그러므로 본 연구에서 제시한 회귀 값에 지면 변동에 의한 변동 값이나, 단기적인 해수면 변화에 의한 값이 포함되어 있어 기존 연구의 회귀 값과 다소 차이가 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서 사용된 분위 회귀 분석 방법은 종속 변수의 조건부 분위를 중심으로 선형 모형 함으로써 모든 분위에서의 변화를 분석할 수 있다는 장점이 있다. 또한 이 방법은 평균이 아닌 상위 또는 하위 등 모든 분위에서의 추세를 분석할 수 있으며, 자료의 분포나 이상치에 크게 영향을 받지 않는다는 장점이 있다(Koenker and Schorfheide, 1994; Cade and Noon, 2003; Koenker, 2005; Lee *et al.*, 2013).

분위 회귀분석 모형은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_i = \beta_\tau X_i + u_{\tau i}, \quad Q_\tau(y_i | X_i) = \beta_\tau X_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

$y_i$ 는 종속변수,  $X_i$ 는 독립변수,  $\beta_\tau$  분위  $\tau$  계수값,  $u_{\tau i}$ 는 오차항을 의미한다.  $Q_\tau(y_i | X_i)$ 는  $X$ 가 주어진 상태에서  $y$ 의  $\tau$ 번째 조건부 분위를 나타낸다. 일반적인 회귀 분석 방법에서는 선형 회귀 값과 실제 자료 값과의 차이의 제곱의 합이 최소가 되는 값을 찾는다. 분위 회귀 방법에서는 비대칭적으로 가중치가 적용된 잔차의 절대값들의 합을 최소화시키는 방법으로 그 계수를 구한다(Koenker and Hallock, 2001). 분위회귀계수  $\beta_\tau$ 의 추정치는 주어진 분위( $\tau$ )에서 다음 함수를 최소화함으로써 얻을 수 있다.

$$\text{Min} \left[ \sum_{y_i > \beta_\tau X_i} \tau |y_i - \beta_\tau X_i| + \sum_{y_i < \beta_\tau X_i} (1 - \tau) |y_i - \beta_\tau X_i| \right]$$

여기서  $\tau$ 는 0과 1사이의 값을 가지며, 음의 오차에는  $(1-\tau)$ 의 가중치를, 양의 오차에는  $\tau$ 의 가중치를 부여하여 해당 분위를 기준으로 가중치에 변화를 준다(Lee *et al.*, 2012).

### 3. 연구 결과

#### 3.1 빈도 분포 함수 분석

일반적으로 수온, 기온 등의 자료는 평균의 빈도가 가장 높고 극단 값의 빈도가 점진적으로 줄어드는 정규(Gaussian normal) 분포와 유사한 분포를 가지게 된다. 그러나 강수량 자료는 강수가 내리지 않는 경우가 많이 존재하기 때문에 수온 자료와는 다른 멱함수(power law) 형태의 분포를 나타내게 된다. 즉, 강수량 자료는 강수량이 0인 빈도가 가장 높게 나타나며, 강수량이 커질수록 자료의 빈도가 작아지는 형태를 가진다(Zhang *et al.*, 2011). 그러므로 자료의 종류에 따라 자료 분포 형태가 매우 다르기 때문에 조위 자료의 자료 분포의 특성을 우선적으로 파악할 필요가 있어, 본 연구에서는 18개 검조소 자료의 빈도 분포를 확인하였다(Fig. 2). x축은 조위를 나타내며, y축은 해당 조위에서의 자료 빈도 비율(%)을 나타낸 것이다. x축의 범위는 -100 (mm) ~ 900 (mm)로 일정하며 1 mm 간격으로 자료의 빈도 분포 비율을 계산하여 나타냈다.

본 연구에서는 18개 조위 관측소에서 1993년부터 2016년의 총 24년의 동일 기간 동안 수집된 시간 단위 자료를 사용하였다. 그러나 각각의 조위 관측소마다 결측 자료 및 품질 관리 과정에서 제거된 자료의 개수가 다르기 때문에, 모든 검조소에서

실제로 사용된 자료의 개수를 그래프의 오른쪽 상단에 별도로 표기하였다. 모든 관측소에서 최소 97% (예: 울릉도(전체 210,384개, 사용개수 204,705개, 97.3%)) 이상의 자료가 사용되었기 때문에, 분석 자료의 개수에 따른 결과 해석이 달라질 가능성은 없다고 판단된다.

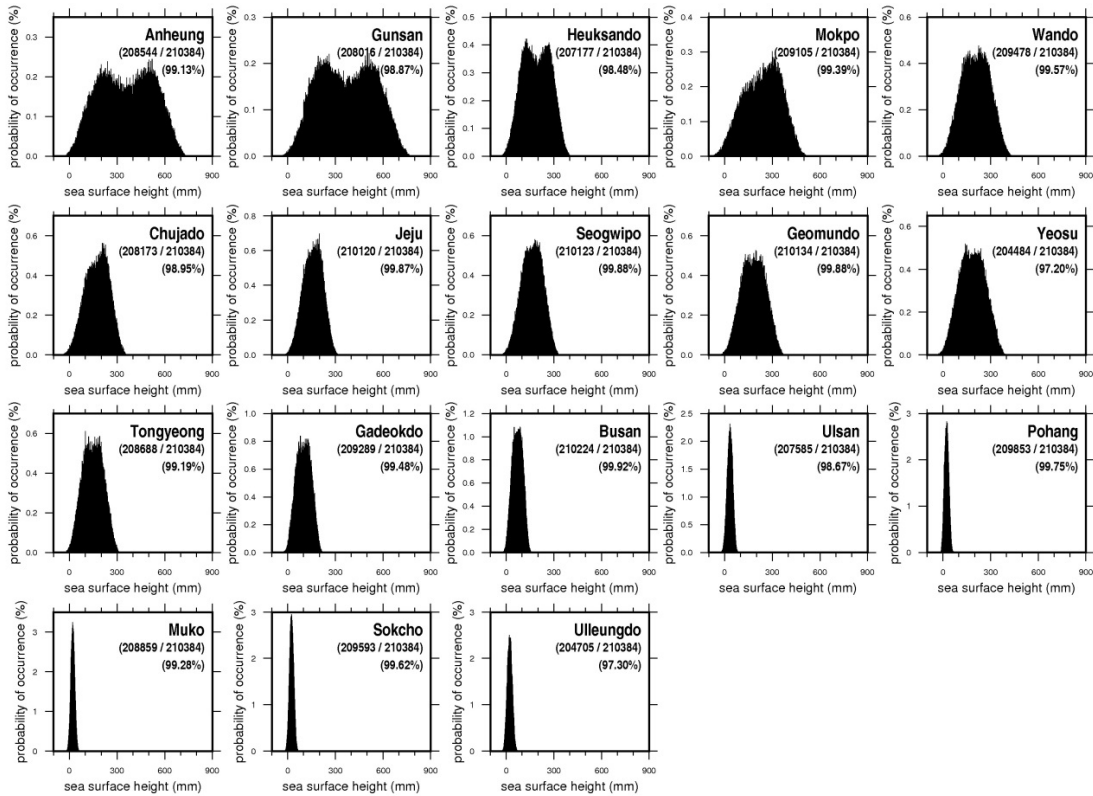


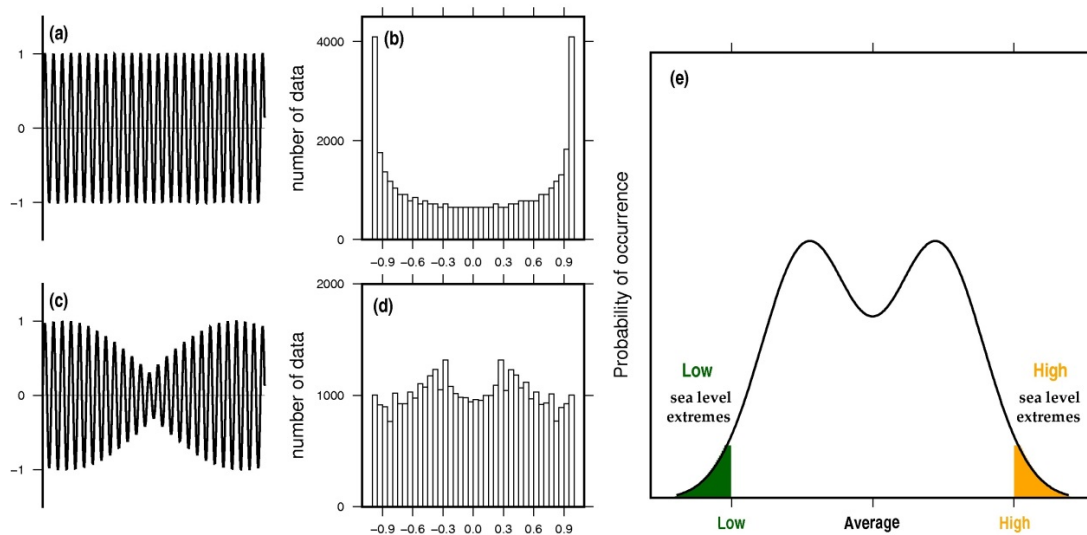
Fig. 2. Frequency distribution function of sea surface height in each tide gauge station. Station name is denoted in the upper-right side of each function and information of available data is denoted below the station name.

대한민국 남해안과 동해의 조위 분포는 침도와 왜도는 약간씩 다르지만 비교적 정규 분포와 유사한 특징을 보였으나, 황해에 위치한 안흥과 군산, 흑산도의 빈도 분포 함수에서 다른 검조소에서는 보이지 않는 명확한 두개의 침두 형태(bimodal)를 갖는 것으로 나타났다. Ko *et al.* (2013)은 국립 해양 조사원에서 제공하는 8개 검조소의 2011년 1년간의 자료를 이용하여 빈도 분포를 분석하였다. 그 결과 포항, 속초에서는 1개의 침두 형태를 보이고, 제주, 여수, 부산에서는 편평한 침두 형태가 나타나며, 인천, 군산에서는 2개의 대칭형 침두 형태가, 그리고 목포에서는 비대칭형 침두 형태가 나타난다고 보고하였다. 이러한 결과는 본 연구의 분석 내용과 일치한다. 그러나 자료의 간격을 매 시간이 아닌 10분 간격으로 내삽하여 빈도 분포를 확인한 결과, 황해에서 bimodal 형태가 더 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, bimodal 형태가 나타나지 않는 것으로 보였던 대한민국 남해안의 검조소에서 bimodal 형태가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 분포 특성은 1993년부터 2016년까지 24년간의 매 년 자료의 자료에서 계절과 시간에 관계없이 모두 동일하게 나타나는 것을 본 연구를 통해서 추가로 확인하였다.

조석의 가장 간단한 개념인 평형 조석론에 의하면 조석은 지구의 바다가 태양과 달이 지구에 미치는 기조력에 의해 주기적으로 오르내리는 현상을 의미하며, 천문조석(astronomical tides)이라고도 부른다. 이러한 천문학적 영향에 의해 발생하는

조석은 주기성을 가지게 되며, 이는 삼각함수의 합으로 나타낼 수 있다. 따라서 자료가 bimodal로 나타내는 요인을 찾기 위해서, 이상적인 삼각함수들을 이용하여 빈도 분포를 분석하고 이러한 형태가 나타내는 이유를 찾아 보았다.

Fig. 3(a)는 이상적인 삼각함수를 그래프로 나타낸 것이며, Fig. 3(c)는 삼각함수의 빈도 분포 함수를 나타낸 것이다. 삼각함수의 빈도 분포가 0 근처에서는 매우 낮게 나타나며, 양극단(-1, 1)에서는 매우 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 x값에 따른 y값의 변화, 즉 미분 계수가 0이 되는 곡선의 꼭지점 부분에서 가장 작게 되고, 0 근처의 값일 때 가장 크게 나타난다. 따라서 일정한 간격으로 x값이 주어질 때, 가장 느리게 변화하는 양 극단에서 값이 가장 많이 분포하게 되고, 0 근처로 갈수록 값이 더 적게 분포하게 되는 것이다. 그러나 실제 해수면 변동에서는 반일주기의 조석 신호가 약 보름 주기로 대조기와 소조기가 나타나고 이에 따라 조차가 다르게 변동된다. 따라서 이러한 변동을 고려하여 진폭이 변동하는 삼각 함수를 이용하여 분석을 실시하였다. Fig. 3(b)는 진폭이 변동하는 삼각 함수를 그래프로 나타낸 것이며, Fig. 3(d)는 빈도 분포 함수를 나타낸 것이다. 진폭이 일정한 삼각 함수의 경우 양 극단에서 그 값이 최대로 나타나지만, 진폭이 변하는 경우 그 극 값이 양 극단이 아닌 중앙으로 모이는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 대조기와 소조기가 나타나는 조석 자료의 특성에 의하여 bimodal의 형태가 나타나며, 추가적으로 폭풍 해일이나 이상 파랑등과 같은 이상 해면 현상에 의해 양 극단 값이 추가적으로 나타나는 것으로 볼 수 있다. Fig. 3(e)는 조위 자료에서 나타나는 빈도 분포 함수를 이상적으로 나타낸 것이다. 이러한 분포는 일반적으로 알려진 강수량의 분포에서 나타나는 맥 함수 형태를 띠지 않으며, 수온의 분포에서 나타나는 중간값이 최빈값을 나타내지도 않는 것으로 나타났다. 그러나 수온의 분포와 같이 양 극단에서 극한 값이 나타났다. 즉, 평균값을 중심으로 bimodal 형태를 가지며, 양 극단에서는 극단적으로 낮은 해수면(extreme low)과 극단적으로 높은 해수면(extreme high)이 나타난다.



**Fig. 3.** Ideal trigonometrical time series of (a) sine and the corresponding (b) frequency distribution function. (c) and (d) provide the same information except for sine function with varying amplitude over time. (e) Schematic diagram of the probability distributions of sea surface height. Extreme high or low areas are denoted by the shaded areas.

### 3.2 분위 회귀 분석

Fig. 3(e)에서 나타난 바와 같이 조위 자료에서는 극단적으로 낮거나 극단적으로 높은 양 극단의 자료를 이상 기후 값으로

판단할 수 있다. 따라서 양 극단에 대해 분위 회귀를 적용하여 변동성을 확인하였다. Table 1은 18 개 검조소의 분위 회귀 결과 및 기존 선형 회귀 방법(OLS)의 결과를 나타낸 것이다. 본 연구에서 제시된 OLS 결과와 기존 연구 결과들과 비교했을 때, 전체적인 추세 경향은 유사하게 나타났으나, 포항, 울릉도, 목포 등에서는 서로 간의 결과 값에 큰 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다(Appendix I). 이러한 차이는 자료 분석 기간이 서로 상이하 며, 본 연구에서는 극한 변동을 포함시키기 위해 기존에 수행하던 품질관리 기법을 적용하지 않았으며, 지반 침하와 같은 지면 변동이나 인위적 요인에 의한 해수면 변동도 고려하지 않았기 때문인 것으로 사료된다. 흑산도의 하위 분위 및 군산, 여수, 통영의 상위 분위기를 제외한 모든 검조소 분위에서 해수면이 상승하는 것으로 나타났으며, 특히 포항, 울릉도 제주의 해수면 증가율은 5 mm/year를 넘는 것으로 나타났다. 기존 선형 회귀 방법에 비해 중간 분위의 회귀 값( $\beta_{0.5}$ )은 적은 숫자의 이상 값에 영향을 받지 않는 강건성(robustness) 및 저항성(resistance)을 갖는다. 따라서 기존 선형 회귀 값과 중간 분위의 회귀 값의 차이는 자료가 얼마나 극단 값의 영향을 받는지를 나타내는 지표가 된다. 황해에 위치한 안흥, 군산, 흑산도, 목포에서 기존 선형 회귀 결과 값이 중간 분위의 회귀 값보다 2~3 mm/year정도 더 높게 나타나며, 이러한 현상은 황해의 상위 분위에서의 극단 값이 기존 선형 회귀 결과에 영향을 크게 주고 있음을 의미한다.

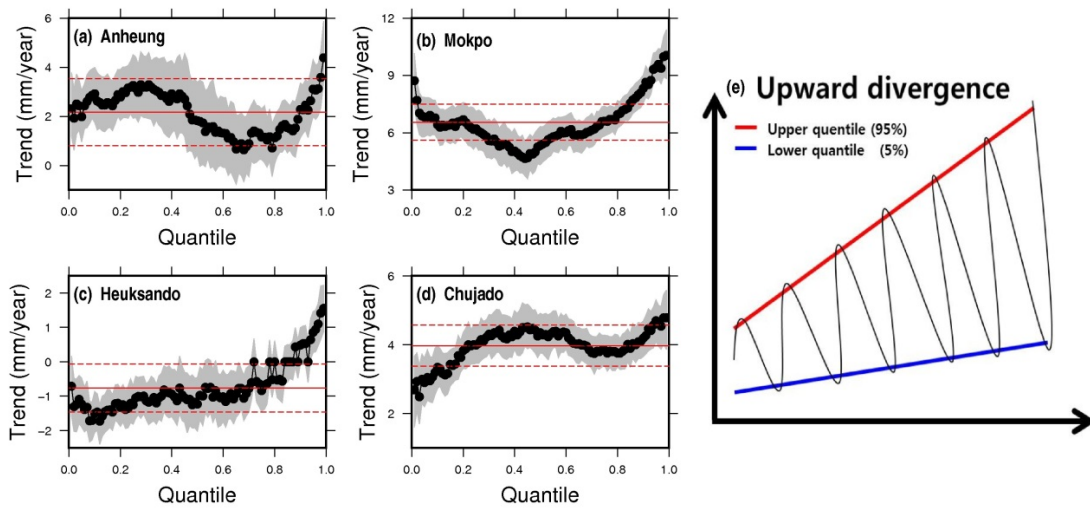
**Table 1.** OLS (Ordinary Least-Square) and quantile regression result of each tide gauge station

	OLS	$\beta_{0.01}$	$\beta_{0.05}$	$\beta_{0.5}$	$\beta_{0.95}$	$\beta_{0.99}$
Anheung	2.17	1.20	0.96	0.43	2.00	3.42
Gunsan	4.29	8.32	7.94	2.43	-1.12	-2.47
Heuksando	-0.76	-1.56	-1.90	-2.01	0.27	0.88
Mokpo	6.55	7.53	5.78	4.31	8.67	8.84
Wando	2.74	4.00	4.18	1.52	1.43	1.03
Chujado	3.97	1.59	2.20	3.76	4.09	3.86
Jeju	6.81	4.92	6.69	6.71	5.22	5.29
Seogwipo	3.02	4.35	4.12	2.65	0.70	0.96
Geomundo	4.87	5.87	6.59	4.10	3.05	3.03
Yeosu	1.53	3.84	4.14	1.01	-2.37	-2.61
Tongyeong	3.07	5.28	5.07	2.83	-0.55	-0.72
Gadeokdo	5.73	5.41	6.73	5.88	3.35	3.15
Busan	3.39	2.95	4.06	3.18	1.96	2.30
Ulsan	4.56	5.71	5.28	4.50	3.39	3.31
Pohang	10.48	9.93	9.51	10.65	10.47	10.46
Muko	3.24	3.08	2.96	3.35	2.69	2.48
Sokcho	3.66	3.12	3.16	3.65	3.42	2.84
Ulleungdo	8.46	4.90	6.34	8.48	9.99	9.64

모든 해역에서 전체적으로 해수면이 증가하는 것으로 나타나지만, 분위별로 다소 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 목포, 흑산도, 안흥에서는 상위 분위( $\beta_{0.99}$ )에 비해 중간 분위의 값이 2 mm/year 이상 작게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 여수, 통영, 거문도 서귀포 등에서는 상위 분위( $\beta_{0.99}$ )에 비해 중간 분위( $\beta_{0.5}$ )가, 그리고 중간 분위( $\beta_{0.5}$ )에 비해 하위 분위( $\beta_{0.01}$ )가 더 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 차이는 해역별로 매우 다르게 나타나는 것으로 확인되었으며, 이러한 차

이를 더 명확히 확인하기 위해 모든 분위에서의 선형 추세를 연속적으로 확인할 수 있는 process diagram을 이용하여 분석하였다.

Fig. 4(a)~(d)는 황해에 위치한 안흥, 흑산도, 목포, 추자도의 process diagram이다. Process diagram은 분위 회귀 결과를 분위별로 확인할 수 있는 도표로 x축을 분위, y축을 회귀 값으로 하여 각 분위에서의 회귀 값을 검은색 점으로 나타내며 회귀 값의 90% 신뢰 구간을 회색으로 나타내어 분위 회귀의 신뢰구간을 표시한다. 또한 동일한 자료를 이용하여 계산한 최소자승법을 이용한 선형 회귀 결과 값을 붉은색 선으로 나타내고 그 결과의 90% 신뢰 구간을 붉은 점선으로 나타내어 분위별 회귀 값의 변화와 기존 결과 값을 한눈에 확인할 수 있다는 장점이 있다. Lee *et al.* (2012)은 process diagram을 이용하여 일 강수량의 분위별 변화를 분석하였으며, 최근에 들어서 극한 강수가 증가하고 있다고 밝혔다. Table 1에서 확인한 바와 같이 흑산도의 하위 분위에서 중간 분위까지 음의 분위 회귀 결과를 나타내고 있으며, 다른 지역에서는 전체 분위에 대해서 양의 회귀 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한 하위 분위와 중간 분위의 차이는 유의미하게 나타나지 않았지만, 중간 분위에 비해 상위 분위가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 전체적으로 증가하는 해수면에서 분위별로 해수면이 다르게 변화한다는 것을 의미하며, 황해에서는 상위 분위의 증가치가 다른 분위에 비해서 크게 나타나는 상향 발산형(upward divergence)으로 분류될 수 있다(Fig. 4(e)).



**Fig. 4.** (a)~(d) Process-diagrams show trends in hourly sea surface height distribution in the Yellow Sea by quantile, from 0.01 to 0.99 in increments of 0.01. Trends are estimated coefficients from quantile regression. The point-wise 90% confidence band is shown in grey. The solid red line is the mean trend from a least-squares regression of hourly sea surface height data and the dashed red lines delineate the 90% point-wise confidence band concerning this trend. (e) The schematic for the linear trend of upper and lower quantile of this region.

Fig. 5(a)~(i)는 대한민국 남해안에 위치한 완도, 여수, 통영, 가덕도, 부산, 울산, 제주, 서귀포, 거문도의 process diagram이다. 여수, 통영의 상위 분위기를 제외한 대한민국 남해안 전체 검조소의 모든 분위에서 해수면이 상승하는 것으로 나타났으며, 기존 선형 회귀 값에서도 대한민국 남해안의 모든 검조소에서 해수면이 상승하는 것으로 나타났다. 그런데 이러한 상승 경향은 분위별로 다소 차이가 나타나는데 하위 분위의 회귀 값이 기존 선형 회귀 값이나 중간 분위 값보다 유의미하게 큰 값을 나타내며, 상위 분위의 회귀 값이 중간 분위의 값과 기존 선형 회귀 값보다 유의미하게 작은 값을 나타냈다. 이러한 경향은 전체적인 해수면 증가 추세에서 상위 분위의 증가치가 중간 분위, 하위 분위에 비해 매우 작게 나타나는 상향 수렴형(upward



convergence)의 형태로 해수면이 변동하는 것으로 나타났다(Fig. 5(e)).

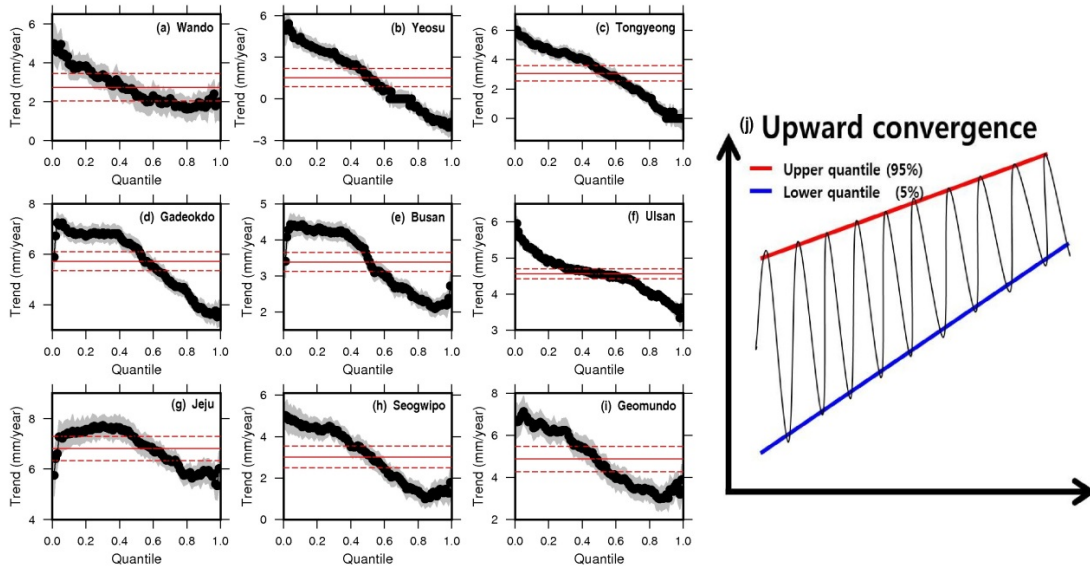


Fig. 5. The same as Fig. 4 except for the South Sea of Korea.

이러한 분위 별 차이가 해역 별로 다르게 나타나는 이유를 확인하기 위하여 조석 성분을 제거한 자료를 이용하여 추가적인 분석을 실시하였다. 황해를 포함한 동중국해는 반일 주조 성분이 매우 크게 나타나기 때문에(Song *et al.*, 2013), 반일 주조 성분만을 제거한 경우와 모든 조석 성분을 제거하는 두 가지 경우에 대해서 분석하였다. 반일 주조 성분만을 제거하기 위하여 조화 분석 결과를 이용하였고 (Pawlowicz *et al.*, 2002), 모든 조석 성분을 제거하기 위하여 tide killer filter를 사용하였다 (Thompson, 1983; Shirahata *et al.*, 2016). Fig. 6(a)는 조화 분해를 통해 반일 주조 성분을 제거하여 일 주조 성분과 비 조석 성분이 남아있는 자료의 process diagram이며, Fig. 6(b)는 조석 성분을 모두 제거한 process diagram이다. 붉은 선과 푸른 선은 각각 대한민국 남해안과 황해의 분위 별 회귀 값을 나타낸다.

반일 주조를 제거한 경우, 분위별 선형 회귀 값들이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 대한민국 남해안에서 나타나는 하위 분위에서의 증가 경향이 사라지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 황해에서 나타났던 상위 분위가 다른 분위에 비해 크게 나타나는 상향 발산형의 형태가 그대로 나타나는 것을 확인할 수 있다(Fig. 6(a)). 모든 조석 성분을 제거한 경우, 황해에서 나타났던 상위 분위의 증가 경향도 사라지는 것을 확인할 수 있다. 또한 대한민국 남해안과 황해에서 나타나는 process diagram 경향이 모두 유사하게 나타났다. 모든 분위에서 증가 경향을 나타내고 있으며, 그 경향이 50~60%에서 가장 크게 나타나 황해 검조소 및 일부 대한민국 남해안 검조소에서의 비 조석 성분에 의한 해수면 상승을 확인할 수 있다(Fig. 6(b)).

그러므로 대한민국 남해안에서 나타나는 상향 수렴형 형태는 반일 주조 성분의 영향을 가장 크게 받으며, 황해에서 나타나는 상향 발산형 형태는 일 주조 및 기타 장주기 조석 성분의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다. 관련된 자세한 물리과정을 설명하기 위해서는 추가적인 자료 분석 및 다양한 수치 실험의 필요성이 제기된다. 일례로 Song *et al.* (2013)은 경기만 및 중국 장수만의 조간대가 간척되지 않았을 때와 간척되었을 때의 동중국해 및 황해의 조석의 변화에 대한 수치 모델 실험을 실시하였다. 그 결과, 조간대가 간척에 의해 사라지게 되면 조간대에 저장되어 있는 에너지가 소실되게 되고, 이 에너지가 재분배되어 간척된 주변 해역뿐만 아니라 다른 해역에도 원격(far-field effect)으로 해수면 변화를 야기한다고 주장하고 있다(Song *et*

al., 2013). 본 연구에서 나타나는 황해, 대한민국 남해안에서의 나타난 분위 회귀 형태는 조건대 간척 사업 등 동역학적으로 조석 변화를 일으킬 수 있는 해안선 및 해저 지형 변화 등에 영향을 받을 수 있음을 예상할 수 있다.

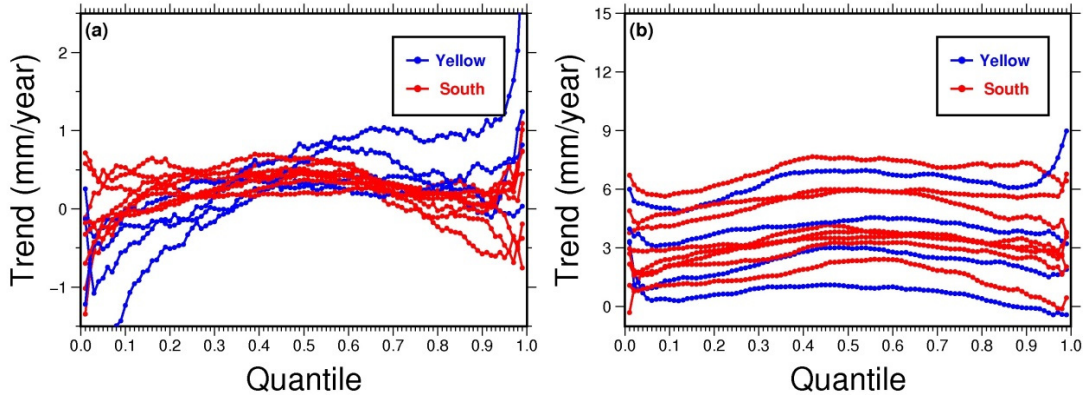


Fig. 6. Process diagram of sea surface height after removing (a) semidiurnal tide constituents and (b) whole tide components. blue (red) line denotes the results in the Yellow Sea (South sea of Korea).

#### 4. 요약 및 제언

본 연구에서는 분위 회귀 방법을 이용하여 한반도 연안에 위치한 18개 검조소의 조위 자료의 분위 회귀 분석을 실시하였다. 조위 자료의 빈도 함수 분석을 통해 조위 자료에서 나타나는 극한 값의 분포를 알아보았으며, 분위별 회귀 분석과 기존 선형 회귀 분석의 결과 값을 서로 비교하였다.

조위 자료의 빈도 함수 분석 결과, 안흥, 흑산도의 빈도 함수에서 bimodal 형태가 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 현상을 확인하기 위해 이상적인 삼각 함수의 빈도 함수 분석을 실시하였다. 그 결과 양 극단의 값의 분포가 크게 나타나고 중간 값(0)의 분포가 작게 나타나는 것을 확인할 수 있고, 대/소조기를 고려한 삼각함수의 빈도 분포 함수에서 bimodal 형태로 빈도 분포가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 조위 자료에 bimodal 형태가 나타나며 폭풍 해일이나 이상 해면과 같은 단기 해수면 변동 현상에 의해 bimodal 형태의 양 극단의 극한 값이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

조위 자료의 분위 회귀 및 기존 선형 회귀를 실시한 결과, 기존 결과와 전체적인 추세 경향은 유사하지만 포항, 울릉도에서 기존 연구와 회귀 값이 다소 차이 나는 것을 확인할 수 있었다(KHOA, 2016). 이러한 차이는 지반 침하나 인위적 요인에 의한 해수면 변동을 고려하지 않았기 때문인 것으로 사료된다. 분위 회귀 분석 결과의 중간 분위와 선형 회귀 결과와의 차이를 비교해본 결과 황해에서 2~3 mm/year의 차이가 남을 알 수 있었으며, 이러한 차이는 황해의 해수면이 상위 분위의 극한값 변화와 밀접히 연관된다. 또한 해역별로 하위분위와 중간 분위, 상위분위의 값이 모두 다르게 나타나는 것을 확인하였다. Process diagram으로 검조소 별 분위 회귀 결과를 확인해본 결과, 황해에 위치한 안흥, 흑산도, 목포, 추자도에서는 다른 분위에 비해서 상위 분위의 회귀 값이 더 크게 나타나는 상향 발산형을 가지는 것을 확인할 수 있으며, 대한민국 남해안에 위치한 완도, 여수 등 9개 검조소에서 상위 분위의 값이 하위 분위보다 매우 낮은 상향 수렴형의 형태를 갖는 것으로 나타났으며, 이는 반일 주조 조석 성분 및 조석 성분을 모두 제거했을 경우 제거되는 경향을 확인하였다.

본 연구에서는 국립해양조사원에서 제공하는 18개 검조소 자료를 이용하여 분위 회귀 분석을 실시하고 해역 별로 차이점을 확인하였다. 또한 각 조석 성분이 해역 별로 분위별 회귀 결과에 다른 영향을 미치는 것을 확인하였다. 그러나 비 조석 성

분 자료에 의한 분위 회귀 형태가 대부분의 검조소에서 유사하게 나타나는 이유에 대한 추가적인 분석이 필요할 것으로 사료된다. 이를 위해 향후 조석 효과가 포함되어 있는 지역 수치 모델을 효율적으로 이용할 수 있을 것이라 기대된다.

## 사 사

본 연구는 “충청 씨그리트 사업(충남 서해안 극한 해양 변동 지수 분석 및 전망)”과 “한국연구재단(2016R1D1A1B03931519)”의 지원에 의해 수행되었습니다. 논문을 세밀히 검토해 주시고 좋은 의견을 주신 편집위원님과 두 분의 심사위원님들께 감사드립니다.

## 참고문헌(References)

- Barbosa, S.M. and K.S. Madsen, 2012. Quantile analysis of relative sea-level at the Hornbæk and Gedser Tide Gauges. *Geodesy for Planet Earth*, 567-571.
- Barbosa, S.M., 2008. Quantile trends in Baltic sea level. *Geophys. Res. Lett.*, **35**: L22704.
- Barbosa, S.M., M.J. Fernandes and M.E. Silva, 2004. Nonlinear sea level trends from European tide gauge records. *Annales Geophysicae*, **22**: 1465-1472.
- Buchinsky, M., 1994. Changes in the US wage structure 1963-1987: Application of quantile regression. *Econometrica.*, 405-458.
- Cade, B.S. and B.R. Noon, 2003. A gentle introduction to quantile regression for ecologists, *Front. Eco. Env.*, **1**: 412-420.
- Elsner, J.B., J.P. Kossin, T.H. Jagger, 2008. The increasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Nature*, **455**: 92-95.
- Hao, L. and D.Q. Naiman, 2007. *Quantile regression (No. 149)*, Sage.
- Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC), 1985. *Manual on sea level measurement and interpretation, Vol. 1. Basic Procedures. IOC Manuals and Guides No. 14, IOC, Paris, 83 pp.*
- IPCC, 2013. *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.*
- Jeon, D.C., 2008. Relative sea-level change around the Korean peninsula. *Ocean Polar Res.*, **30**: 373-378.
- Jevrejeva, S., A. Grinsted, J.C. Moore and S. Holgate, 2006. Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records. *Geophys. Res. Oceans*, **111**: C09012.
- Jung, T.S., 2014. Change of mean sea level due to coastal development and climate change in the western coast of Korean peninsula. *J. Korean Soc. Coast Ocean Eng.*, **26**: 120-130.
- Kang, J.W., S.R. Moon and N.S. Oh, 2005. Sea level rise at the southwestern coast. *J. Korean Soc. Civil Eng.*, **25**: 151-157.
- KHOA, 2015. *Analysis and prediction of sea level variation result report. 252 pp.*
- KHOA, 2016. *Analysis and Prediction of Sea Level change in Response to Climate Change around Korean peninsula result report. 278 pp.*
- Ko, D.H., S.T. Jeong and H. Cho, 2013. Statistical characteristics of hourly tidal levels around the Korean peninsula. *J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng.*, **25**: 365-373.
- Koenker, R. and F. Schorfheide, 1994. Quantile spline models for global temperature change. *Climatic Change*, **28**: 395-404.
- Koenker, R. and G. Bassett Jr, 1978. Regression quantiles, *Econometrica.*, 33-50.

- Koenker, R. and K.F. Hallock, 2001. Quantile regression. *J. Econ. Perspect.*, **15**: 143-156.
- Koenker, R., 2005. Quantile regression (No. 38), Cambridge university press.
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency(KHOA), 2012. Precise analysis and prediction of sea level fluctuation (4th) result report. 505 pp.
- Lee, K., H.J. Baek and C.H. Cho, 2012. Analysis of changes in extreme precipitation in Seoul using quantile regression. *J. Clim. Res.*, **7**: 199-209.
- Lee, K., H.J. Baek, and C.H. Cho, 2013. Analysis of changes in extreme temperatures using quantile regression, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**: 313-323.
- Lim, B.J. and Y.S. Chang, 2016. Development of synthetic regression diagram for analyzing linear trend of sea surface height, temperature, and salinity around the Korean marginal seas. *The Sea*, **21**: 67-77.
- Mazvimavi, D., 2010. Investigating changes over time of annual rainfall in Zimbabwe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **14**: 2671-2679.
- Min, H.S. and C.H. Kim, 2006. Interannual variability and long-term trend of coastal sea surface temperature in Korea. *Ocean Polar Res.*, **28**: 415-423.
- Na, J.Y., S.K. Han, J.W. Seo, Y.G. Noh and I.S. Kang, 1997. Empirical orthogonal function analysis of surface pressure, Sea surface temperature and winds over the East Sea on the Korea (Japan Sea). *Korean J. Fish. Aquat. Sci.*, **30**: 188-202.
- Oh, S.Y., S.W. Jang, D.H. Kim and H.J. Yoon, 2012. Temporal and spatial variations of SL/SST in the Korean peninsula by remote sensing. *J. Fish. Mar. Sci. Educ.*, **24**: 333-345.
- Pawlowicz, R., B. Beardsley, and S. Lentz, 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. *Comput. Geosci.*, **28**: 929-937.
- Shirahata, K., S. Yoshimoto, T. Tsuchihara and S. Ishida, 2016. Digital filters to eliminate or separate tidal components in groundwater observation time-series data. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, **50**: 241-252.
- So, B.J., H.H. Kwon and J.H. An, 2012. Trend analysis of extreme precipitation using quantile regression. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **45**: 815-826.
- Song, D., X.H. Wang, X. Zhu and X. Bao, 2013. Modeling studies of the far-field effects of tidal flat reclamation on tidal dynamics in the East China Seas, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **133**: 147-160.
- Tareghian, R. and P. Rasmussen, 2013. Analysis of Arctic and Antarctic sea ice extent using quantile regression. *Int. J. Climatol.*, **33**: 1079-1086.
- Thompson, R. O., 1983. Low-pass filters to suppress inertial and tidal frequencies. *J. Phys. Oceanogr.*, **13**: 1077-1083.
- Uranchimeg, S., Y.T. Kim, H.H. Kwon and K.N. Hwang, 2015. A study on trend analysis in sea level data through MK test and quantile regression analysis. *J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng.*, **27**: 94-104.
- Yoon, H.J, B.J. Hwang, S.H. Kim and S.A. Ryu, 1999. Studies on sea level and sea surface temperature changes and correlation using satellite data, Korean Meteorological Society 1999yr Spring Invited Conference, pp. 88-89.
- Yoon, J.J. and S.I. Kim, 2012. Analysis of long period sea level variation on tidal station around the Korea peninsula. *Journal of KOSHAM.*, **12**: 299-305.
- Zhang, X., L. Alexander, G.C. Hegerl, P. Jones, A.K. Tank, T.C. Peterson, B. Trewin, and F.W. Zwiers, 2011. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change*, **2**: 851-870.

**Appendix I.** Summary of results for the long-term linear trends of sea surface height along the Korean coast based on ordinary least-square method

	This study		Lim and Chang (2015)		KHOA (2016)		KHOA (2015)	
	Data Period	Trend (mm/year)	Data Period	Data Period	Data Period	Trend (mm/year)	Data Period	Trend (mm/year)
Anheung	1993-2016	2.17	1993-2013	1.71	1993-2015	1.01	1993-2014	1.89
Gunsan	1993-2016	4.29	1993-2013	2.77	1993-2015	1.86	1993-2014	1.97
Heuksando	1993-2016	-0.76	1993-2013	-2.3	1993-2015	0.1	1993-2014	0.15
Mokpo	1993-2016	6.55	1993-2013	5.12	1993-2015	1.25	1993-2014	1.23
Wando	1993-2016	2.74	1993-2013	1.54	1993-2015	1.55	1993-2014	1.41
Chujado	1993-2016	3.97	1993-2013	3.09	1993-2015	2.43	1993-2014	1.61
Jeju	1993-2016	6.81	1993-2013	7.76	1993-2015	5.63	1993-2014	5.7
Seogwipo	1993-2016	3.02	1993-2013	2.25	1993-2015	3.75	1993-2014	3.73
Geomundo	1993-2016	4.87	1993-2013	4.61	1993-2015	4.3	1993-2014	4.25
Yeosu	1993-2016	1.53	1993-2013	0.63	1993-2015	1.74	1993-2014	1.72
Tongyeong	1993-2016	3.07	1993-2013	2.31	1993-2015	2.06	1993-2014	2.01
Gadeokdo	1993-2016	5.73	1993-2013	4.34	1993-2015	3.15	1993-2014	2.94
Busan	1993-2016	3.39	1993-2013	2.98	1993-2015	2.6	1993-2014	2.59
Ulsan	1993-2016	4.56	1993-2013	4.62	1993-2015	1.56	1993-2014	1.08
Pohang	1993-2016	10.48	1993-2013	10.97	1993-2015	5.98	1993-2014	5.82
Muko	1993-2016	3.24	1993-2013	2.55	1993-2015	2.73	1993-2014	1.06
Sokcho	1993-2016	3.66	1993-2013	2.81	1993-2015	2.74	1993-2014	2.71
Ulleungdo	1993-2016	8.46	1993-2013	6.04	1993-2015	3.74	1993-2014	2.77

	KHOA (2012)		Yoon and Kim (2012)		Jeon (2008)	
	Data Period	Trend (mm/year)	Data Period	Trend (mm/year)	Data Period	Trend (mm/year)
Anheung	1989-2011	0.91	-	-	-	-
Gunsan	1983-2011	3.72	1982-2010	2.4	1981-2002	1
Heuksando	1982-2011	0.14	1973-2010	0.6	1979-2002	3
Mokpo	1972-2011	1.5	1960-2010	1.5	1960-2002	1.1
Wando	1985-2011	1.29	1982-2010	1.7	1983-2002	2
Chujado	1986-2011	2.32	-	-	-	-
Jeju	1978-2011	6.07	1964-2010	5.3	1964-2002	5.1
Seogwipo	1985-2011	5.02	1985-2010	5.9	1985-2006	7.3
Geomundo	1985-2011	5.09	1982-2010	5.5	1982-2002	5.8
Yeosu	1969-2011	1.91	1966-2010	1.4	1970-2002	1.9
Tongyeong	1979-2011	1.98	1977-2010	2	1977-2002	2.1
Gadeokdo	1983-2011	2.47	1978-2010	2.3	1977-2002	1.8
Busan	1975-2011	2.72	1960-2010	1.8	1961-2002	1.8
Ulsan	1977-2011	1.41	1965-2010	0.6	1963-2002	-0.3
Pohang	1977-2001	2.56	1973-2010	4.4	1972-2002	2
Muko	1972-2011	2.19	1966-2010	0.7	1965-2002	0.1
Sokcho	1977-2011	2.61	1974-2010	2.2	1974-2002	2.4
Ulleungdo	1983-2004	3.01	1979-2010	2	1979-2002	1.8