



국내 연안역의 해수면 변화 분석방법 연구

A Study on Analysis Method of Sea Level Change in Korean Coastal Zone

양수현* · 최승배** · 류흥렬** · 황규남*

*전북대학교 토목공학과

**㈜하이드로봇테크앤리서치

Su-Hyun Yang* · Seung-Bae Choi** · Hong-Ryul Ryu** · Kyu-Nam Hwang*

*Department of Civil Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea

**Hydrobot Tech & Research Corp., Jeonju, Korea

Abstract

In this study, the analysis of sea level change using Lanczos filtering, a filtering method of Fourier transform, was performed. The high frequency(short period) of tide was excluded by low-pass filter of Lanczos filtering, the analysis of sea level change was carried out considering only low frequency(long period). First, all tide data provided by the Korea Hydrographic and Oceanographic Administration(KHOA) were preprocessed to delete the error value, the astronomical tide and the meteorological tide repeated in short period were excluded by Lanczos filtering. The Mean Sea Level(MSL) for each tidal station was calculated using these results, the MSL tended to rise at most point in the Korean coastal zone. And the rate of sea level change, which means annual sea level change(mm/year), was estimated and compared with previous study results. The rate of sea level change was higher than values in past study, this means that future sea level change may be greater than previous expected. The analysis method applied to this study can be effectively used to improve the accuracy of prediction of sea level change.

Keywords : Tide, Sea level change, Mean sea level, Lanczos filtering, Low-pass filter

1. 서론

지구 온난화에 따른 가장 큰 영향 중의 하나인 해수면 상승은 인구 및 산업시설이 집중되어 있는 연안역에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 연안 저지대 범람, 해안 침식, 폭풍해일 및 홍수 등에 의한 직접적 피해를 증가시키고(KHOA, 2010; Nicholls, 2002; Oh et al., 2011), 시설물의 설계고 추산 및 흐름, 파랑의 흐름에 영향을 미쳐 연안 시설물의 안정성이나 기능성에 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다(Yoon and Kim, 2012).

기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)의 5차보고서(2014)에 따르면, 1901~2010년 동안 전 지구 평균해수면 상승률은 1.7 mm/year에 이르며, 1990년대 이후에 더 높은 해수면 상승률을 예측하였다(Fig. 1 참조). 우리나라의 경우, 2010년 말까지의 자료분석 결과에서 2.48 mm/yr의 연평균 해수면 상승률을 보여 전 세계 평균 상승률보다 훨씬 상회하는 것으로 보고되고 있다(Jung, 2014; Yoon and Kim, 2012).

이와 같이 전 지구적 평균해수면의 변화와는 별개로 각 나

라별 해수면 변화는 그 양상이 크게 다를 수 있으며(Oh et al., 2011), 이러한 지역적 차이는 지구 온난화와 같은 자연적 요인 뿐만 아니라 지역별 다양한 인위적 요인(연안 개발정도, 풍속, 기압 등)에 의해 국내 연안역에서도 각기 다르게 나타난다. Jung(2014)에 따르면, 우리나라의 연안에서의 해수면 상승률은 서해에서 1.36 mm/year로 국내 연평균 상승률보다 작게 나타나며, 제주부근에서는 5.81 mm/year로 연

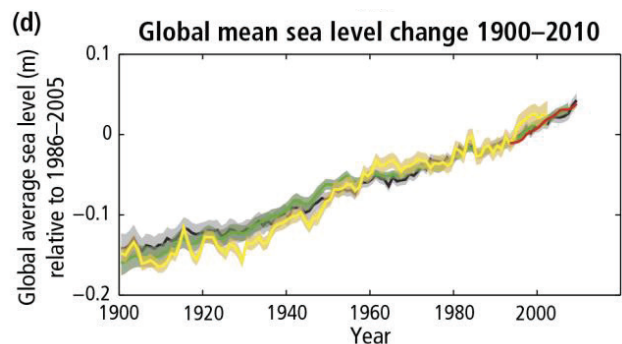


Fig. 1. Global mean sea level change (1900~2010) (IPCC, 2014)

평균 상승률보다 2배 이상의 상승률을 보이는 등 국내 연안 역에서도 지역적 해수면 상승이 크게 변화하는 것으로 제시되고 있다.

해수면 상승률이 시간적/공간적으로 다르게 나타남에도 불구하고, 대다수의 국내외 해수면 변화 연구들은 관측된 전체기간 혹은 광범위한 해역 전체에 대해 해수면 상승률이 일정하다고 가정된 결과를 제시하고 있다. 또한 대부분의 기존 연구들은 조위 관측자료를 산술평균한 결과로부터 해수면 변화량을 추정(KHOA, 2011; Yoon and Kim, 2012; Kang et al., 2005)함으로써 해수면의 상승 혹은 하강과 같은 변화양상을 분석하였는데, 이러한 분석은 해수면의 장/단기 변화요인에 대해 고려하지 않고 평균해수면 상승량을 추정하였기 때문에 실제와는 다르게 추정했을 가능성이 있다(Jung, 2014). 특정 연안지역에서의 해수면 상승률을 정확하게 파악하는 것은 연안에서의 시설물 안정성 확보를 위한 재해 위험성 평가의 정확성 제고를 위해 중요한 사항이므로, 이를 위해 조위 관측자료로부터 단기 변동성을 제외(Jensen et al., 2010; Jung, 2014)하고 장기적으로 해수면 변화에 영향을 미치는 요소를 고려한 분석이 수행되어야 한다.

한편, 해수면의 변화를 예측하는 방법은 크게 두 가지로 구분될 수 있다. 하나는 기후모델의 예측결과를 이용하는 방법과 다른 하나는 과거의 관측자료(조위 등)를 이용하여 그 변화경향을 분석하는 것이다. 전자는 전 지구적 해수면 변동특성 분석에 주로 사용되고, 후자는 지역적 해수면 변동특성 조사에 유용하게 사용되는데(Oh et al., 2011), 과거 관측자료를 이용하는 것은 장기적인 미래의 해수면 변동을 예측하는데에는 한계가 있으나 특정 연안역에서의 관측자료에 기반한 것이기 때문에 지역적 해수면 변동특성을 파악하는데 적합하다.

이에 본 연구에서는 관측된 조위(수위) 관측자료를 이용하여 국내 연안역에서의 해수면 변화분석이 수행되는데, 조위 관측자료로부터 단순히 산술평균하여 평균해수면 상승량을 추정했던 과거 연구(KHOA, 2011; Yoon and Kim, 2012)와는 달리 장기적으로 해수면 변화를 유발하는 요인만을 고려한 해수면 변화 분석을 수행하고자 하였다. 이를 위하여 푸리에(Fourier) 변환을 이용한 필터링 방법 중의 하나인 Lanczos 필터링 분석기법을 적용하여 국내 연안역에서의 해수면 변화분석을 수행하였다.

2. 분석자료 및 분석방법

2.1 조위자료 수집

우리나라의 해수면 변화에 대한 연구는 연안에서의 조위 관측 자료를 중심으로 이루어지고 있다(Yoon and Kim, 2012). 본 연구에서는 국내 연안역에 대한 해수면 변화 분석을 위하여 국립해양조사원(<https://www.khoa.go.kr>)에서 운영하는 모든 조위관측소의 1시간 조위 관측자료를 수집하

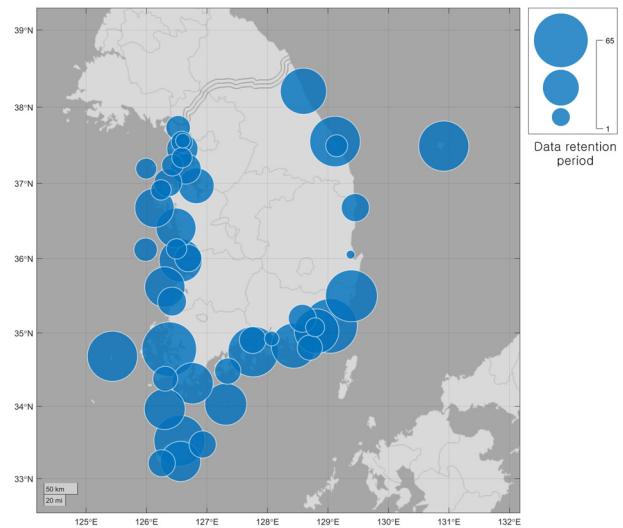


Fig. 2. Location of tidal station

였다. 현재 운영되고 있는 조위관측소는 총 47개소이며, 각 조위관측소별 관측시작일은 각기 다르나 관측시작일부터 2020년 7월까지 결측을 포함한 전 기간의 모든 관측자료를 수집하여 분석에 사용하였다. 가장 많은 관측자료를 보유하고 있는 관측소는 부산 및 목포 관측소로 1956년부터 관측이 시작되어 약 65년간의 조위 관측자료를 보유하고 있으며, 포항관측소의 경우 2018년 9월부터 관측이 시작되어 관측자료 보유연수가 가장 짧다. 조위관측소는 동해안 7개소, 서해안 21개소, 남해안 14개소 및 제주 4개소가 위치하고 있으며, 각 조위 관측소의 위치는 각 관측소의 관측자료 보유 연수와 함께 표기되어 Fig. 2에 제시된다.

2.2 조위 분석방법

기존의 해수면 변화 연구는 평균해수면의 변화분석, 고극조위 변화율 산정 및 장주기 성분분석 등의 사례가 있는데(Yoon and Kim, 2012), 국내의 해수면 변화연구에 주로 사용되는 방법은 관측된 조위자료를 산술평균하여 평균해수면을 산정하고 이를 이용하여 해수면의 상승 혹은 하강의 추세를 파악하거나 조위자료로부터 고극조위(Highest High Water Level)를 산정하여 그 변화양상을 파악하는 것이다. 이들 방법은 관측된 조위자료를 이용하여 해수면 변동량을 단순히 추정하기에는 간편할 수 있으나, 천문조, 기상조 및 기후 변화 등에 의한 영향의 구분없이 분석이 수행되었기 때문에 장래의 해수면 변화를 정확하게 추정하기에는 어려움이 있다. 따라서, 해수면 변화를 유발하는 원인들 중 장기적으로 해수면 변화에 영향을 미치는 요소만을 고려한 분석이 수행되어야 정확한 해수면 변화 산정이 가능하다.

이에 본 연구에서는 국내 연안역의 해수면 변화를 분석하기 위하여 푸리에(Fourier) 변환을 이용한 방법인 Lanczos 필터링(Lanczos, 1956; Claude, 1979; Roy and Cynthia, 1981)을

적용한 분석이 수행되었다. Lanczos 필터링을 통한 시계열의 변환은 다음의 Eq. (1)에 의해 이루어진다.

$$y(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} w_i x(t) \quad (1)$$

여기서, $y(t)$ 는 변환된 출력값(output data), t 는 시간, w_i 는 필터가중치, $x(t)$ 는 관측을 통해 수집된 조위 입력자료(input data)를 의미한다. Eq. (1)의 푸리에 변환을 취함으로써 입력과 출력 푸리에 진폭밀도함수 $X(f)$ 와 $Y(f)$ 가 얻어지는데, 그 결과는 다음과 같다.

$$Y(f) = R(f) \cdot X(f) \quad (2)$$

여기서, f 는 주파수(frequency), $R(f)$ 는 주파수응답함수(frequency response function)이며, 앞서 Eq. (1)에 제시된 가중치 w_i 와 Eq. (2)의 응답함수 $R(f)$ 는 다음에 의해 산정된다.

$$R(f) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} w_i \exp(i2\pi f k \Delta) \quad (3)$$

$$w_i = \frac{1}{2f_N} \int_{-f_N}^{f_N} R(f) \exp(-i2\pi f k \Delta) df, \quad k = \dots, -1, 0, 1, \dots \quad (4)$$

여기서, Δ 는 데이터 간격, 즉 1시간을 의미하고, f_N 은 나이퀴스트 주파수(Nyquist frequency)로 데이터 간격의 1/2주기 값을 갖는다. 이외의 Lanczos 필터링에 대한 자세한 사항은 Claude(1979)에 제시된다.

일반적으로 해수면 변화는 조석 자체의 변화와 비조석 변화로 구분될 수 있는데, 인위적 개발이 없는 자연 상태에서의 조석의 변화, 즉 천문조(astronomical tide)의 변화는 매우 미미하며, 비조석 변화는 풍속, 기압, 지구온난화 및 연안개발 등에 의해 유발되는 변화이므로 국지적으로 다르게 나타날 수 있다(Kang et al., 2008; Pugh, 2004). 천문조는 달, 태양 등의 천체와 지구간의 인력에 의해 발생하는 조석인데, 우리나라의 조석에 가장 지배적인 영향을 미치는 주요 4대 분조, 즉 M_2 , S_2 , K_1 및 O_1 분조는 반일주조(semidiurnal tides) 및 일주조(diurnal tides)로써 각각 약 12시간 및 24시간 내외의 주기를 갖는다. 이외에도 15일, 30일, 1년 등의 주기를 가진 장주기조가 조석에 영향을 미치나 주요 4대 분조에 비해 그 크기가 현저하게 작은 것으로 알려지고 있다.

한편, 풍속, 기압 등의 기상적 요인, 즉 기상조(meteorological tide)에 의해 발생하는 해수면 변화는 1일을 주기로 변화하는 기상일주조와 계절 주기로 변화하는 태양반년주조, 태양년주조로 구분될 수 있다. 이 중 일반적인 바람, 기압의 변화 등으로 발생하는 해수면 변화는 수 초에서 수 분 이내의 단주기 성분이며, 강풍이나 쓰나미 등과 같이 급변하는 조건에서도 최대 수십 분 이내의 단주기 변동만이 발생한다.

반면, 지구온난화에 의해 상승하는 해수면 변화는 이와는 크게 다른 양상을 보이는데, 해수온도의 상승으로 해수가 팽창하고 빙하가 녹아 해수의 양이 증가함으로써 발생하는 해수면 상승은 앞서와는 다르게 상대적으로 장주기적 변동을 야기한다.

앞서 서론에서 설명한 바와 같이, 해수면 변화를 정확하게 파악하기 위해서는 조위 관측자료로부터 단기 변동성을 제외하고 분석(Jensen et al., 2010; Jung, 2014)하여 장기적으로 해수면 변화에 영향을 미치는 요소들을 고려한 분석이 수행되어야 한다. 이에 본 연구에서는 앞서 설명한 Lanczos 필터링을 이용하여 단기적 변동성을 제외하고 해수면 변화를 분석하였으며, 저역통과필터(Low-pass filter)를 이용하여 특정 주파수 이하의 성분만 통과시켜 단주기적 변동성을 제외하였다. 주파수는 단위시간당 한 점을 통과하는 파동의 수를 의미하는데, 해수면 변화에서의 주파수 단위는 cycles/day로 볼 수 있으며, 주기 12시간을 갖는 반일주조에 의해 하루 두 번 고조와 저조가 나타난다고 했을 때의 주파수는 2 cycles/day, 주기 24시간을 갖는 일주조의 주파수는 1 cycle/day이다. 앞서 설명한 바와 같이 우리나라 해수면 변화에 지배적인 영향을 미치는 주요 4대 분조는 반일주조 및 일주조로써 이에 해당하는 주파수에 저역통과 필터를 적용하면 관측결과에서 주기적인 조석성분을 제거할 수 있다. 또한 기상조에 의해 발생하는 해수면 변화 중 일시적 기상변화에 의한 단주기 변동 또한 제거할 수 있기 때문에, 결과적으로 장기적으로 해수면 변화에 영향을 미치는 인자들만 고려한 분석이 가능해진다.

저역통과필터의 컷오프(cutoff) 주파수는 우리나라 해역에 가장 지배적인 영향을 미치는 주요 4대 분조, 즉 일주조 이하 성분을 배제시키기 위하여 0.889 cycles/day(27시간)을 적용하였는데, 주요 4대 분조보다 영향력은 상대적으로 작으나 일주조에 포함되어 있는 조석성분 중 가장 긴 주기를 갖는 Q_1 분조의 주기 26.87시간(약 27시간)을 컷오프 기준으로 선택하였다(Table 1 참조). 저역통과필터를 사용하면 해당 주파수 이하(장주기) 값은 통과되고, 해당 주파수 이상(단주기) 값은 제거되어 장주기 성분만 남게 된다.

저역통과필터(Low-pass filter)를 적용시킬 때, 컷오프(cutoff) 주파수 이상의 응답이 0으로 떨어지는데 이때 생기는 불연속점에서 기브스 진동(Gibbs oscillation)이 발생할 수 있다. Lanczos 필터링은 이러한 기브스 진동의 진폭을 크게 감소시키는 필터링 방법 중의 하나이며(Claude, 1979), 또한 기법의 적용이 매우 간단하기 때문에 본 연구에서 분석자료로 사용하는 다량의 데이터 분석 적용에 적합한 방법으로 판단된다.

Table 1. Type and period of tidal constituents

Type	Symbol	Period(hr)	Type	Symbol	Period(hr)
semidiurnal tides	M_2	12.42	diurnal tides	K_1	23.93
	S_2	12.00		O_1	25.82
	N_2	12.66		P_1	24.07
	K_2	11.97		Q_1	26.87
				S_1	24.00

3. 분석결과

3.1 단주기 변동성분이 제외된 조위 분석결과

자료의 분석을 위하여 우선 국립해양조사원에서 제공하는 모든 조위관측소의 1시간 간격 조위자료(rawdata)를 검토한 결과, 관측자료에 연속적으로 '0'이 기록되어 있거나 조위 변동추세와 전혀 상관없는 오류 값이 포함되어 있어 해당 자료를 삭제하는 전처리 과정을 수행하였다. 자료 전처리 후, Lanczos 필터링의 저역통과필터를 이용하여 27시간 이하의 단주기적 변동성분을 배제하였으며, 이를 통해 도출된 동/서/남해안 및 제주해역의 대표 조위관측소에서 분석결과가 Fig. 3~Fig. 6에 제시된다. 각각의 그림에는 (a) 조위관측소에서 관측된 조위자료와 (b) Lanczos 필터링 결과, 그리고 이들 각각의 시계열 자료로부터 푸리에 변환을 통해 얻어진 주파수(frequency)-강도(amplitude) 스펙트럼이 (c) 및 (d)에 함께 제시된다.

우선 Fig. 3(a)~Fig. 6(a)결과를 살펴보면, 관측시작일이 지점별로 다르기 때문에 관측자료의 시작시점은 각기 다르나 각각의 분석결과에서 동해/서해/남해안 및 제주해역의 조석 특성이 분명하게 두드러지는 것으로 나타났다. 서해 해역의 큰 조차에 비해 동해안 해역의 조차는 매우 작게 나타나고 있으며, 서해>남해>제주 해역으로 갈수록 조차는 작아지나 이들 해역에서는 매일 2회의 고조 및 저조가 반복적으로 나타나는 반일주조형 조석형태를 갖는 것으로 나타났다. 단주기적 변동성분을 배제시킨 Lanczos 필터링 결과(각 그림 (b) 참조)는 원자료에 비해 그 값이 크게 감소된 것으로 나타났는데, 조차가 가장 크게 나타나는 서해안 해역에서 그 감소폭이 가장 크며, 동해안 해역의 경우에는 일주조 이하의 주기 배제에 의한 영향이 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. Lanczos 필터링을 수행한 시계열 결과에서 여전히 주기적인 특성이 계속 나타나고 있는데, 일주조 이하의 단주기 성분은 배제되었으나 이보다 더 긴 주기의 다른 천

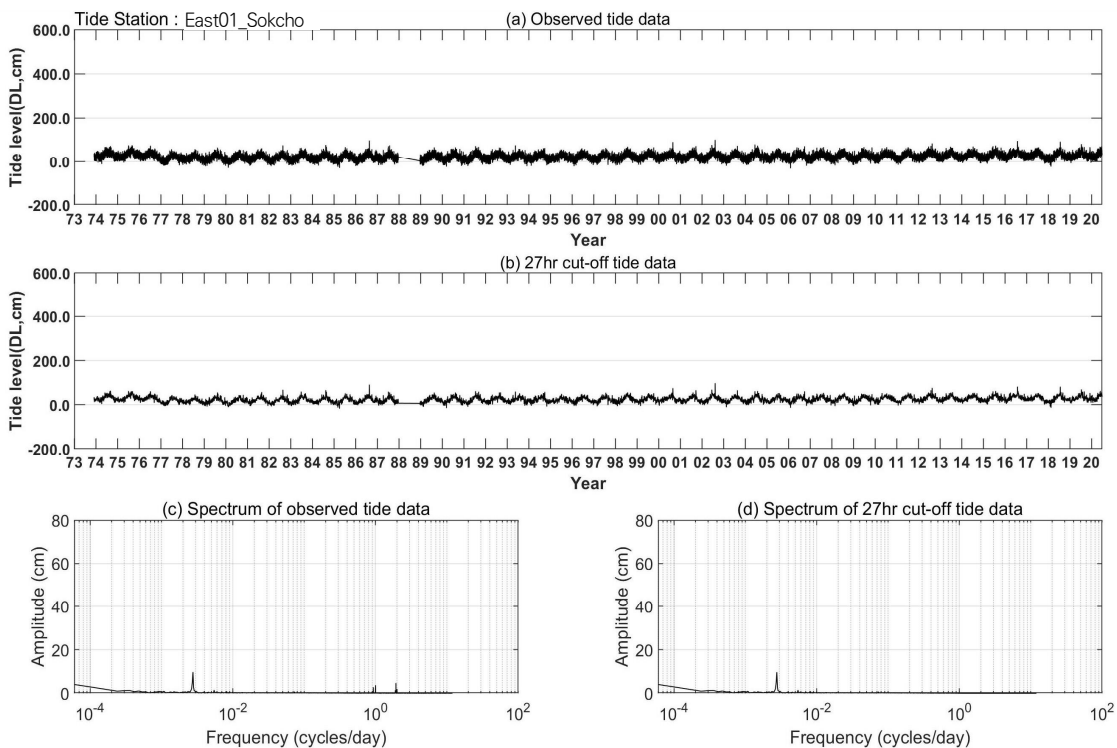


Fig. 3. Results of the tide analysis using the low-pass filter of Lanczos filtering (Sokcho on the East coast)

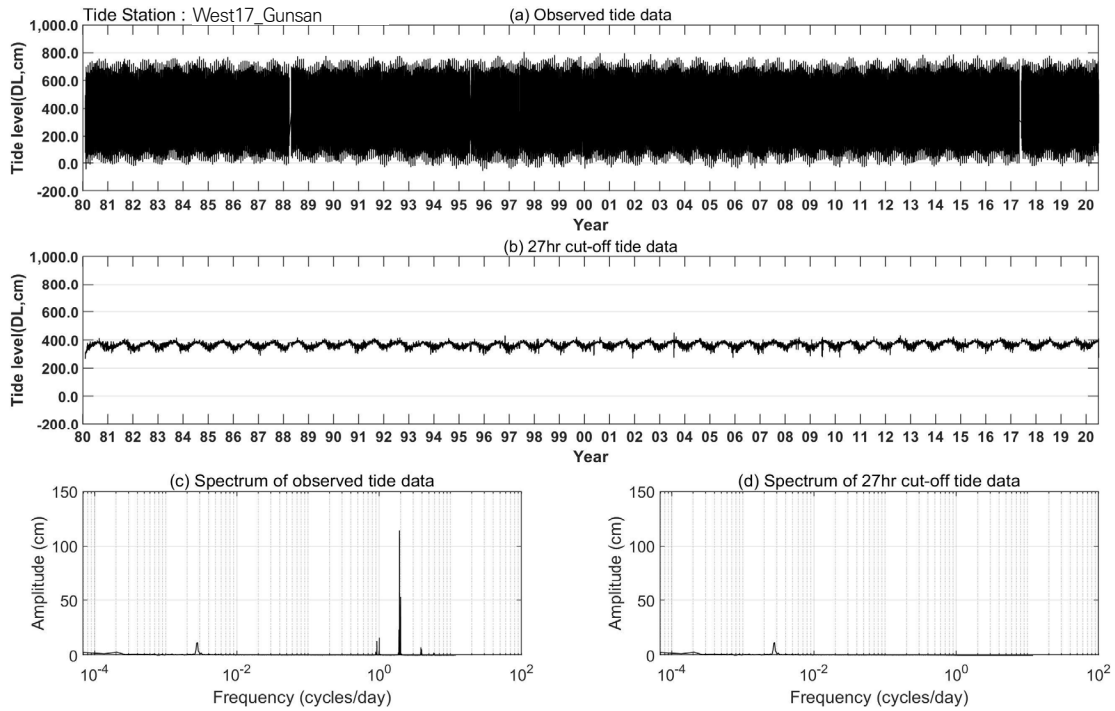


Fig. 4. Results of the tide analysis using the low-pass filter of Lanczos filtering (Gunsan on the West coast)

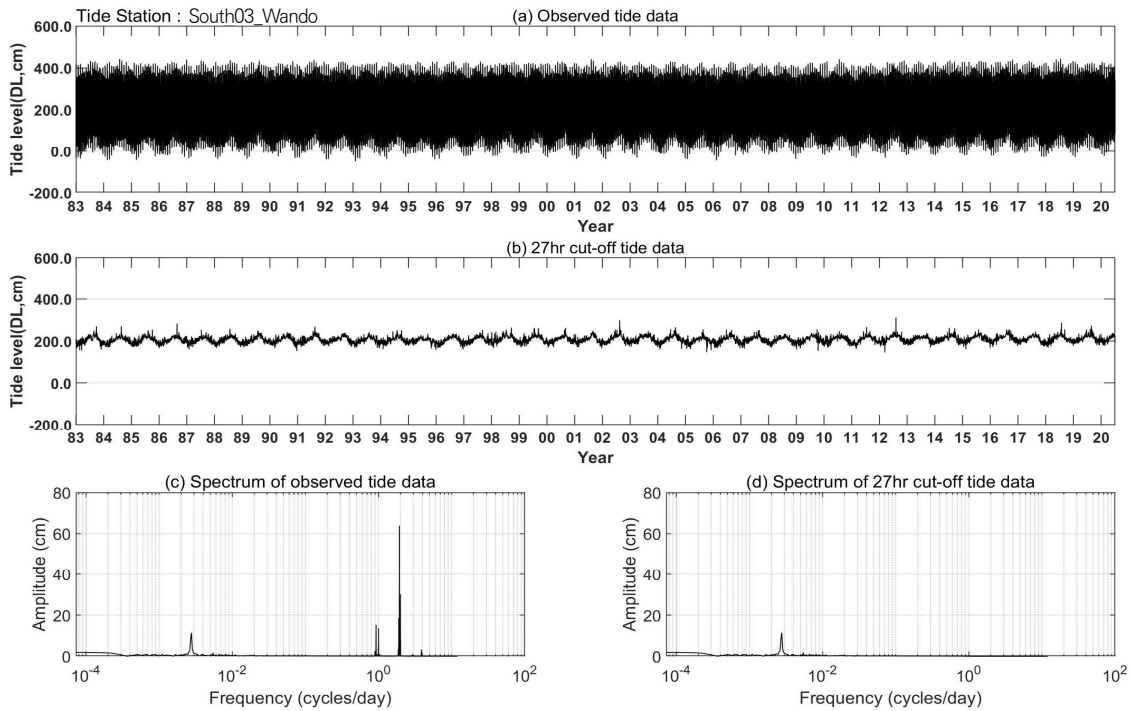


Fig. 5. Results of the tide analysis using the low-pass filter of Lanczos filtering (Wando on the South coast)

문조의 영향이 배제되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 각 그림의 (c) 및 (d)에 제시된 Lanczos 필터링 전/후의 주파수-강도 스펙트럼을 살펴보면, 우선 Fig. 4(c)에 제시된 서해안 군산의 스펙트럼에서 가장 큰 강도를 갖는 주파수는 약 2 cycles/day 내외이며, 다음으로 큰 강도를 갖는 주파수

범위는 약 1 cycle/day이다. 이는 서해안 군산의 해수면 변화에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 하루에 두 번 발생하는 반일주조와 하루 한번 발생하는 일주조임을 나타내는 결과이며, 앞서 언급했던 우리나라 조석에 지배적인 영향을 미치는 주요 4대 분조의 영향으로 이러한 결과가 도출되었다

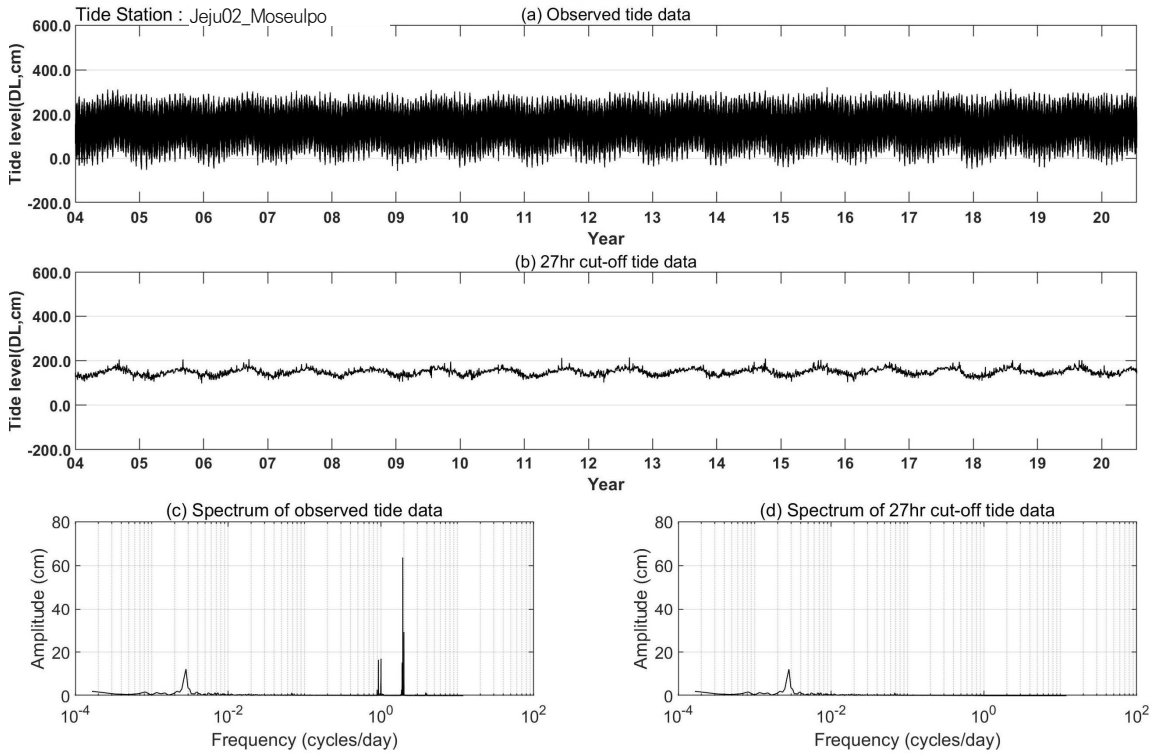


Fig. 6. Results of the tide analysis using the low-pass filter of Lanczos filtering (Moseulpo on the Jeju coast)

고 볼 수 있다. 동일한 원리로 Fig. 5(c) and Fig. 6(c)에 제시된 결과에서도 동일한 양상을 보이고 있으며, 그림에 제시된 대표지점 뿐만 아니라 서해/남해안 및 제주해역의 다른 지점에서도 동일한 결과를 보인다. 그러나 Fig. 3(c)에 제시된 동해안 속초에서의 결과는 이와는 다른 양상을 보이는데, 반일주조 및 일주조에 해당하는 주파수 강도가 다른 해역과는 달리 크지 않은 것으로 나타났으며 이는 동해안 해역의 해수면 변화가 다른해역과는 달리 조석의 영향이 매우 미미하다는 것을 의미한다. 한편, Fig. 3(d)-Fig. 6(d)에 제시된 Lanczos 필터링 후의 주파수-강도 스펙트럼 결과를 살펴보면, 주기 27시간(주파수 0.889 cycles/day)을 기준으로 저역통과필터를 적용하여 큰 주파수, 즉 단주기 성분이 제거되어 장주기 성분만 남아있음을 확인할 수 있는데, 남아있는 장주기 성분 중 가장 큰 강도를 갖는 주파수는 약 0.003 cycles/day 부근이며, 이를 주기로 변환하면 약 330일에 해당된다. Lanczos 필터링의 시계열 결과에서 보여지는 주기적인 특성은 이러한 장주기조에 의한 영향일 것으로 판단된다.

3.2 평균해수면 분석

해수면 변화를 연구하는 방법들 중 가장 대표적인 방법은 평균해수면을 산정하고 그 변화를 분석하는 것이다(Yoon and Kim, 2012). 평균해수면의 산정은 해수면 변화양상을 직관적으로 파악할 수 있는 가장 간단한 방법이며, 과거 대부분

의 연구가 월별(혹은 연별) 평균해수면 값을 제시하고 있으므로 본 연구에서도 국내 연안역에서의 평균해수면 분석을 수행하였다. 조위관측소에서 관측된 조위 원자료(rawdata)는 모든 기초력이 반영된 관측결과이나 정확한 분석을 위해서는 단기적 변동성을 제외하고 장기적 요소를 고려한 분석이 수행(Jensen et al., 2010; Jung, 2014)되어야 하므로, 본 연구에서는 모든 조위관측소 지점에 대하여 Lanczos 필터링 결과를 이용한 월별 평균해수면 분석이 수행되었다.

월별 평균해수면 산정은 47개의 조위관측소 전체지점에 대하여 수행되었는데, 산정결과의 유효성 검증을 위하여 국립해양조사원에서 제공하는 MSL(Mean Sea Level) 값과 비교하였으며 그 결과가 Fig. 7에 제시된다. 본 연구에서 수행된 Lanczos 필터링 결과를 이용한 평균해수면 산정결과는 전 관측기간에 걸쳐 그 값이 대체적으로 국립해양조사원에서 제시한 값과 유사한 범위의 값을 갖는다. 이들 결과의 일치하는 정도를 정량적으로 평가하기 위하여 상대정확도(Relative Accuracy)를 다음의 Eq. (5)에 의해 산정하였으며, 그 결과가 Table 2에 제시된다.

$$RA = \frac{\text{Mean of Lanczos Method}}{\text{MSL}(by\ KHOA)} \times 100 \quad (5)$$

상대정확도는 국립해양조사원에서 제공하는 MSL 값에 대한 Lanczos 필터링의 월별 평균해수면 값의 백분율로 표

현되는데, 상대정확도가 100.0%라는 것은 두 평균해수면 값이 잘 일치한다는 것을 나타낸다. 상대정확도 산출결과를 살펴보면(Table 2 참조), 모든 지점에서 상대정확도가 100% 내외의 값을 갖기 때문에 본 연구에서 산정된 월별 평균해수면 산정결과는 대체적으로 유효한 범위의 값을 갖는다고

할 수 있으며, 동해안 속초에서 최대 4.7%의 차이를 보였고 전체 지점에서 평균 약 100.4%의 상대정확도를 갖는 것으로 나타났다. 그러나, 평균해수면의 분석에서 0.4%의 차이는 해수면 변화양상을 파악하는데 있어 정량적으로 큰 차이를 야기할 수 있다. 해수면의 높이가 200cm일 경우 0.4%의 차

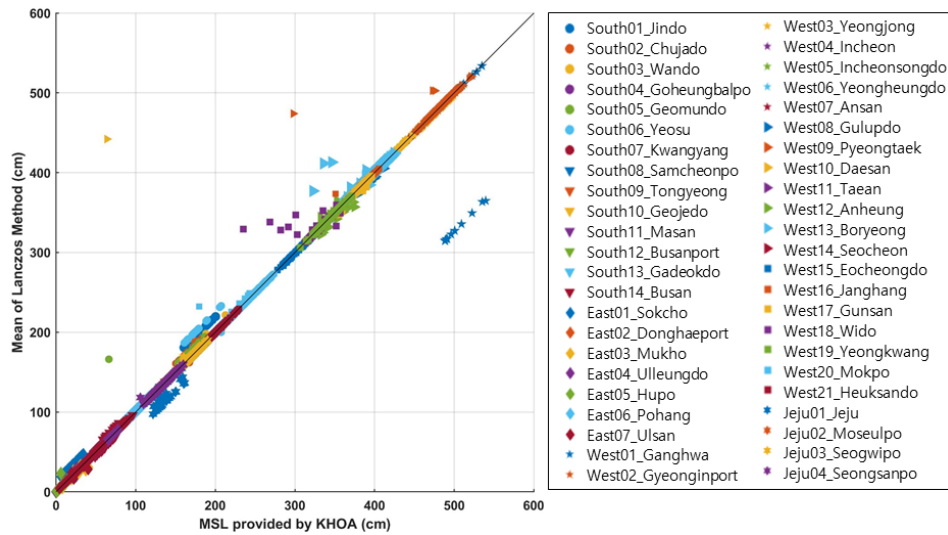


Fig. 7. Comparison of monthly mean sea level at all points

Table 2. Relative accuracy of monthly mean sea level

Area	No.	Site	Relative accuracy (%)	Area	No.	Site	Relative accuracy (%)	
East	1	Sokcho	104.7	West	17	Gunsan	100.1	
	2	Donghaeport	100.2		18	Wido	100.4	
	3	Mukho	99.7		19	Yeongkwang	100.1	
	4	Ulleungdo	100.0		20	Mokpo	100.2	
	5	Hupo	101.5		21	Heuksando	100.1	
	6	Pohang	100.1		South	1	Jindo	100.9
	7	Ulsan	100.0			2	Chujado	100.4
West	1	Ganghwa	97.6	3		Wando	100.1	
	2	Gyeonginport	100.1	4		Goheungbalpo	100.1	
	3	Yeongjong	100.1	5		Geomundo	100.6	
	4	Incheon	100.1	6		Yeosu	100.5	
	5	Incheonsongdo	100.1	7		Kwangyang	100.1	
	6	Yeongheungdo	100.1	8		Samcheonpo	100.1	
	7	Ansan	100.1	9		Tongyeong	100.1	
	8	Gulupdo	100.0	10		Geojedo	100.1	
	9	Pyeongtaek	100.4	11		Masan	100.1	
	10	Daesan	103.0	12		Basanport	100.1	
	11	Taeon	100.1	13		Gadeokdo	100.1	
	12	Anheung	100.1	14		Busan	100.0	
	13	Boryeong	100.3	Jeju		1	Jeju	99.5
	14	Seocheon	100.1			2	Moseulpo	100.1
	15	Eocheongdo	100.1		3	Seogwipo	100.1	
	16	Janghang	100.1		4	Seongsanpo	100.2	

이는 0.8cm에 해당되며 해수면의 높이가 높아질수록 그 차이는 더 커진다. 해수면의 상승률(변화율)이 연간 수 mm (mm/year)로 제시된다는 점을 고려해보면, 이러한 차이로부터 해수면 변화양상이 과거와 크게 달라질 수 있다.

해수면의 변화양상을 정량적으로 산정하기 위하여 Lanczos 필터링의 월별 평균해수면 값에 대하여 선형적합(Linear fitting)을 수행하였는데, 그 중 대표적인 4개 지점에서의 결과가 Fig. 8에 제시된다. 일부 지점을 제외하고 우리나라의 모든 조위 관측소 지점에서 평균해수면은 상승하는 경향을 보이며, 각 지점별 상승률은 정량적으로 크게 다른 것으로 나타났다.

각 지점에서의 평균해수면 상승률이 산정되어 Table 3에 제시되는데, 대부분의 지점에서 전 지구 평균해수면 상승률인 1.7 mm/year(IPCC, 2014)보다 더 큰 상승률을 보이고 있으며, 동해나 서해 해역에 비해 제주해역의 평균해수면 상승률이 더 큰 것으로 나타났다.

한편, 과거 다양한 연구자들에 의해 산정된 지점별 평균해수면 상승률이 정리되어 Table 3에 함께 제시되는데, 본 연구에서 산정된 평균해수면 상승률은 남해안 일부지역을 제외한 거의 대부분의 지점에서 과거 연구결과보다 더 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 본 연구에서 수행된 Lanczos 필터

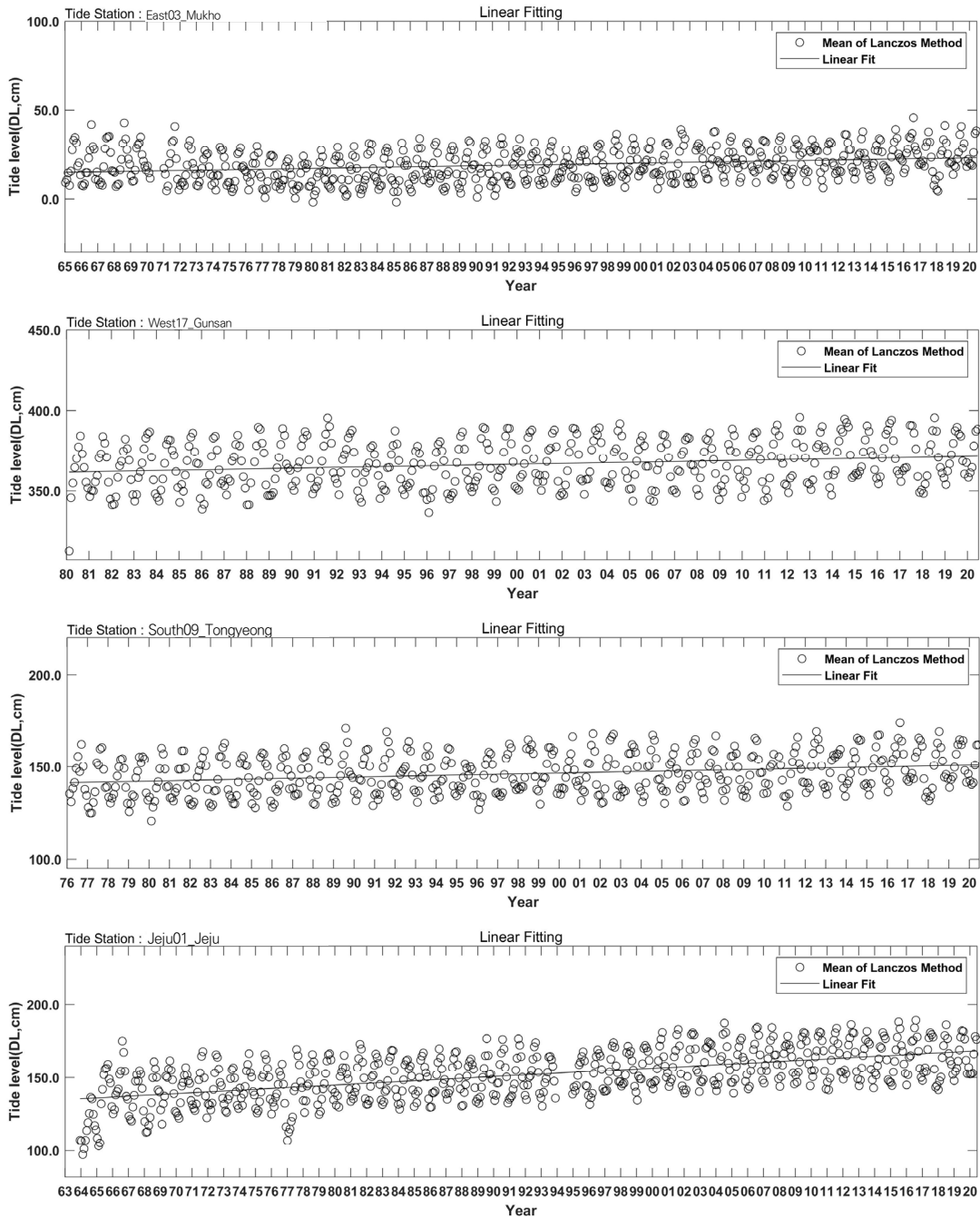


Fig. 8. Trend of mean sea level change

Table 3. Comparison of rate of mean sea level change (unit : mm/year)

Area	Site	Lanczos (this study)	KHOA (2010)	Jung (2014)	Yoon and Kim (2012)
East	Mukho	1.5	-	-	0.7
	Ulsan	1.3	-	-	0.6
West	Incheon	3.1	-	1.1	0.6
	Anheung	2.1	1.1	2.0	-
	Boryeong	5.3	-	2.4	-
	Gunsan	2.5	1.7	2.2	2.4
	Mokpo	5.4	1.3	2.9	1.5
	Heuksando	0.2	1.1	4.2	0.6
South	Wando	1.9	-	-	1.7
	Geomundo	4.1	-	-	5.5
	Yeosu	0.5	-	-	1.4
	Tongyeong	2.2	-	-	5.0
	Gadeokdo	3.4	-	-	2.3
	Busan	2.3	-	-	1.8
Jeju	Jeju	5.8	6.2	5.3	5.3

링을 적용한 분석방법은 장주기적 변동만을 고려하여 산정된 결과인데, 이로부터 도출된 평균해수면 상승률이 더 크다는 것은 장기적 관점에서의 해수면 변화량이 기존에 제시된 결과보다 더 크게 발생할 수 있음을 의미한다. KHOA(2011)에 제시된 연구결과에서 우리나라 연안역에서의 평균해수면 상승이 가속화되고 있다고 제시된 바 있는데, 본 연구로부터 도출된 결과는 이와 일맥상통한다고 하겠다.

본 연구에서 수행된 Lanczos 필터링을 이용한 해수면 변화분석 방법은 단주기적 성분을 배제하고 장주기 성분만을 고려한 분석이 가능하기 때문에 향후 해수면 변화양상 예측의 정확도를 향상시킬 수 있다는 측면에서 큰 의의를 갖는다. 또한, 우리나라 전체 연안역의 모든 조위 관측자료를 이용하여 다량의 관측자료를 빠르고 정확하게 분석할 수 있으며, 각 지점별 관측자료의 양이나 결측자료 포함 여부 등 원자료(rawdata)의 품질이 각기 다르다고 하더라도 일관성 있는 분석이 가능하다는 장점을 갖는다.

그러나 본 연구에서 수행된 연구결과는 일부 조건이 제한된 상태에서 분석이 수행된 것이므로, 향후 이를 보완한 추가 연구가 수행되어야 할 것이다. 우선, 본 연구에서 제시된 평균해수면 상승률은 관측기간 전체에 걸쳐 해수면 상승이 일정하다고 가정하여 도출된 결과이므로, 실제로는 이와 다를 수 있다. 해수면의 상승(혹은 하강)은 시간적으로 그 변화양상이 일정하지 않으며, 변화가 가속화 될 수도 감속화 될 수도 있으므로 선형적합이 아닌 비선형 회귀분석을 통해 상승률의 시간적 변화를 파악하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서는 해수면 변화를 야기하는 요인을 단주기와 장주기로 구분하고, 이 중 단주기 성분을 제외하여 장

주기적 변동을 고려한 분석을 수행하였다. 미래의 해수면 변화 예측의 정확도 향상을 위해 장주기적 변동을 고려한 분석의 수행은 바람직한 분석 방향인 것으로 판단되나, 본 연구에서는 장주 기초, 기후변화(지구온난화) 및 연안개발 등으로 구분되는 장주기 변동을 야기하는 세부 요인들의 영향에 대한 구분없이 분석이 수행되었다. 본 연구에서는 국내의 전체 연안역에 대해 일괄적인 분석을 수행하였기 때문에 각 지점별로 각기 다르게 진행된 연안개발의 세부사항을 고려한 개별분석을 수행하지는 못하였고, 단지 이로 인한 변화가 장주기적 변화에 포함되어 있는 것으로 판단하여 분석이 수행되었다. 과거 Jung(2014)는 연안개발과 기후변화로 인한 변화를 구분하여 그 결과를 제시한 바 있는데, 연안개발 전·후의 평균해수면 추세선의 차이를 가지고 개발로 인한 평균해수면 변동량을 추정하였으며, 해수온도와 해수면 변동의 상관관계 분석을 통해 지구온난화로 인한 변동성 검토를 수행한 바 있다. 본 연구결과를 토대로 장주기 변동을 야기하는 세부 요인별 변화량을 산정한다면 미래의 해수면 변화 예측의 정확도를 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 관측된 조위(수위) 관측자료를 이용하여 국내 연안역에서의 해수면 변화분석을 수행하기 위한 방법으로, 푸리에 변환을 이용한 필터링 방법인 Lanczos 필터링을 이용한 해수면 변화분석을 수행하였다. 우선, 국립해양조사원에서 제공하는 모든 조위관측소의 1시간 조위 관측

자료를 이용하여 이상(혹은 오류) 값을 제외시키는 자료 전처리 과정을 수행하였으며, Lanczos 필터링의 저역통과필터를 이용하여 27시간 이하의 주기를 배제하고 장기적으로 해수면 변화를 유발하는 요인만을 고려한 해수면 변화 분석을 수행하였다.

분석결과, 단주기 성분을 배제한 Lanczos 필터링 결과는 조위 원자료에 비해 그 값이 크게 감소된 것으로 나타났으며, Lanczos 필터링을 적용하였음에도 긴 주기의 다른 천문조의 영향으로 약 1년 주기의 변동이 계속 나타나고 있음을 확인하였다. 해수면의 변화양상을 살펴보기 위하여 Lanczos 필터링을 적용한 결과로부터 월별 평균해수면이 산정되고 선형접합이 이루어졌는데, 거의 모든 지점에서 평균해수면은 상승하는 경향을 보였으며 각 지점별 상승률은 정량적으로 크게 다른 것으로 나타났다. 장기적 해수면 변화 요인만을 고려하여 산정된 본 연구의 해수면 상승률은 과거 모든 기조력이 반영된 결과보다 더 큰 값을 갖는 것으로 산정되었는데, 이는 장기적 관점에서의 미래 해수면 변화량이 기존에 제시된 연구결과보다 더 클 수 있다는 것을 의미한다.

본 연구에서 적용한 Lanczos 필터링 방법은 미래의 해수면 변화 예측의 정확도 향상을 위해 장주기적 성분만을 고려한 분석이 수행되었다는 점에서 큰 의의를 갖는다. 또한, 다량의 관측자료를 빠르고 정확하게 분석할 수 있으며, 각 지점별 관측자료의 품질이 다르다고 하더라도 쉽게 적용할 수 있기 때문에 국내 연안역의 장기간 관측자료 분석에 효과적으로 사용될 수 있다. 이러한 분석을 통하여 해수면 변화의 시간적/공간적 변동을 효과적으로 분석함으로써 연안 시설물의 설계고 추산, 연안 시설물의 안정성 확보를 위한 위험성 평가 등에 유용하게 활용 될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2020R111A1A01072642).

References

- Claude E. D. (1979). "Lanczos filtering in one and two dimensions." *J. of Applied Meteorology*, Vol. 18, pp. 1016-1022.
- Godin, G. (1972). "The analysis of tides." University of Toronto press, 264p.
- IPCC (2014). "Climate change 2014: Synthesis report, Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change." In: Core writing team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland.
- Jensen, J., Wahl, T. and Frank, T. (2010). "Improved estimates on mean sea level change in the South-eastern North Sea since 1843." In: J. M. Smith and P. Lynett (eds.). *Proceedings of 32nd Conference on Coastal Engineering (in CD)*, Shanghai, China, 10p.
- Jung, T. S. (2014). "Change of mean sea level due to coastal development and climate change in the Western Coast of Korean Peninsula." *J. of Korean society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 26, No. 3, pp. 120-130(in Korean).
- Kang, J. W., Moon, S. R. and Oh, N.S. (2005). "Sea level rise at the southwestern coast." *J. of the Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 25, No. 4, pp. 255-265 (in Korean).
- Kang, J. W., Park, S. J and Park, M. W. (2008). "Rising tendencies of both tidal elevation and surge level at the southwestern coast." *J. of Korean society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 20, No. 1, pp. 14-24 (in Korean).
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration(KHOA) (2010). *A study on the sea level change by global warming (II), ministry of land, infrastructure and transport* (in Korean).
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration(KHOA) (2011). *Detailed analysis and prediction (3rd) of sea level change in Korea* (in Korean).
- Lanczos, C. (1956). "Applied analysis." Prentice-Hall, 539p.
- Nocholls, R.J. (2002). "Analysis of global impacts of sea-level rise: a case study of flooding." *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 27, pp. 1455-1466.
- Oh, S.M., Kwon, S.J., Moon, J.I. and Lee, E.I. (2011). "Sea level rise due to global warming in the Northwestern Pacific and seas around the Korean peninsula." *J. of Korean society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 23, No. 3, pp. 236-247(in Korean).
- Pugh, D.T. (1987). "Tides, surges and mean sea level." John Wiley & Sons Ltd.
- Roy, A.W. and Cynthia, H. (1981). "Removing tidal-period variations from time-series data using low-pass digital filters." *J. of Physical Oceanography*, Vol. 12, pp. 112-115.
- Yang, S.-H., Choi, S.-B., Kim, D.-H. and Hwang, K.-N. (2021). "Development of analysis method of sea level change using Lanczos filtering." *Proc. of 2021 Conf. on Korean Society of Coastal Disaster Prevention* (in Korean).
- Yoon, J.J. and Kim, S.I. (2012). "Analysis of long period sea level variation on tidal Station around the Korea peninsula." *J. of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 3, pp. 299-305 (in Korean).