

## 조석/해일 환경변화를 감안한 고극조위 빈도분석

### Frequency Analysis of Extreme High Water Level Considering Tide/Surge Characteristic Changes

강주환\* · 문승록\*\* · 박선중\*\*\*

Kang, Ju Whan · Moon, Seung Rok · Park, Seon Jung

#### Abstract

Due to both global warming and constructions of seadike/seawalls, continuously or abruptly rising tendencies of extreme high water levels have been detected at Kunsan and Mokpo harbors. This paper deals firstly with the separation of each effect, namely global warming effect and construction effect, on increases of water level quantitatively by a linear regression method. And then, it can be explained why and how the extreme high water levels had been risen just after constructions at both harbors. A numerical simulation of  $M_2$  tidal constituent at Mokpo coastal zone shows that the tidal amplification by constructions is mainly due to the extinguishment of TCE at Mokpogu. The tidal flat effect makes the amplification more deepen at spring tide or extreme high tide, which results in the increase of inundation risk at Mokpo harbor. A frequency analysis method is applied, which is shown to be effective at such a site of having non-homogeneous tidal data due to constructions as Mokpo harbor.

**Keywords:** global sea level rise, seadike/seawall, extreme high water level, frequency analysis

#### 요 지

지구온난화에 의한 전지구적 해수면 상승과 더불어 하구언/방조제와 같은 해안구조물 건설이후 군산 및 목포해역에서의 고극조위는 지속적인 증가추세를 보이고 있다. 본 연구에서는 선형회귀분석방법을 이용하여 장기적 변화에 의한 고극조위 상승량과 건설에 의한 고극조위 상승량을 정량적으로 분리한 후, 이들 해역에서 발생하고 있는 고극조위 상승원인을 분석하였다. 목포해역을 대상으로  $M_2$  분조에 대한 수치실험 결과 하구언과 방조제 건설로 인한 조석확폭현상은 주로 목포구의 TCE 기능의 소멸로 인해 발생한 것으로 확인되었다. 조석확폭은 조간대효과에 따라 극조일수록 더욱 크게 나타나 목포해역의 해일 위험성이 매우 높아진 상태가 되었다. 또한 하구언 및 방조제 건설에 따라 조석환경에 변화가 야기되어 건설시기 전후로 조위자료의 동질성이 결여된 곳에 효율적으로 적용할 수 있는 빈도분석 방법을 적용하여 빈도별 고극조위를 산정하였다.

**핵심용어 :** 전지구적 해수면상승, 하구언/방조제, 고극조위, 빈도분석

#### 1. 서 론

평균해수면과 고극조위 등을 포함한 각종 조위면은 장기간에 걸쳐 지속적인 변화를 보인다. 이러한 변화가 초래되는 원인은 조석 자체의 변화와 비조석 변화로 구분할 수 있다. 일반적으로 자연상태에서 조석(천문조)의 변화는 매우 미미하지만 연안에서 건설사업 등 인위적인 해안환경변화가 있는 경우에는 천문조에도 적지 않은 변화가 발생할 수 있다. 비조석 변화로는 태풍 발생빈도 및 태풍의 경로 등에 변화가 있을 경우 야기되는 기상조의 변화, 그리고 지구온난화에 따른 전지구적 해수면 상승 등을 꼽을 수 있다(Pugh, 2004). 천문조의 경우 충분한 정도로 예측이 가능한 반면 기

상조 및 전지구적 해수면 상승 등은 예측하기가 매우 어려운 실정이다. 따라서 두 가지 요소가 복합적으로 작용하여 조위면 변화가 발생한 경우 천문조와 기상조 등을 분리하여 각각에 대한 독립적인 해석을 함으로써 장래 조위예측 및 빈도분석 등의 연구에 있어 효율적이면서 정확도를 제고시키는 효과를 기할 수 있게 된다.

연안해역에서 이루어지고 있는 각종 건설사업은 주변 해역에 여러 가지 형태의 환경변화를 야기하게 되는데, 특히 1980년대부터 시작된 서남해안에서의 대규모 간척사업에 따라 조석체계에 적지 않은 변화가 발생하게 되었다. 이들 변화는 각 해역의 고유한 특성이 내재되어 해역별로 확연히 구분되는 변화양상을 보이고 있다. 1988년 완공된 후 1994

\*정호원 · 목포대학교 토목공학과 교수 · 공학박사(E-mail: jwkang@mokpo.ac.kr)

\*\*정호원 · 목포대학교 토목공학과 박사과정 · 공학석사(E-mail: smugman@mokpo.ac.kr)

\*\*\*목포대학교 토목공학과 박사과정 · 공학석사(E-mail: sjpark@mokpo.ac.kr)

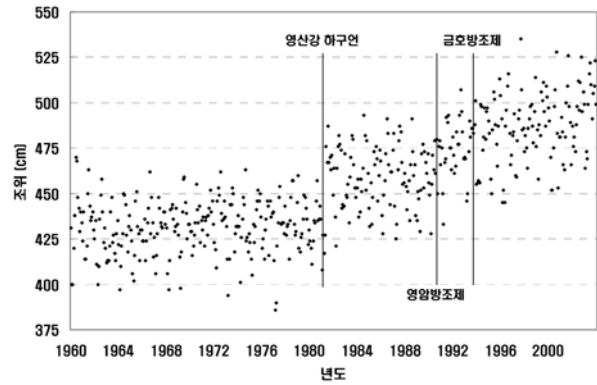
년부터 담수화가 이루어진 금강하구언 건설후 하구언 인근에 위치한 군산내항 부근에 국한된 조위변화외는 달리, 1981년, 1991년, 1994년에 각각 완공된 영산강하구언, 영암방조제 및 금호방조제 건설로 인해서는 목포해역 전반에 걸쳐 조위변화가 발생된 바 있다. 이러한 조위변화는 대조 또는 극조일수록 더욱 심하게 나타나고 있는 동시에 최근 지구온난화에 의한 기상이변에 따른 잦은 태풍발생과 함께 해당해역의 해일피해가 더욱 우려되는 상황이 되고 있다. 하구언 및 방조제 건설에 따라 저지대 침수가 심각한 문제로 대두되고 있는 목포시에서는 최근 지구온난화에 따른 평균해수면 상승과 조석 및 해일환경 변화에 따른 이상고조위의 빈번한 발생 등으로 인해 몇 년 주기로 기왕최고극조위가 경신되고 있는 상태이다. 이에 따른 대책마련을 위해 목포시에서는 관련 연구용역(목포시, 2005)을 수행하는 동시에 각종 침수대책사업이 시행 또는 계획 중에 있다. 이와 함께 2003년 9월 마산만을 강타한 태풍 '매미'의 극심했던 해일피해를 입은 이후 해일관련 연구가 국내에서도 여러 연구자에 의해 활발하게 진행되고 있다. 이들 연구는 해일발생 및 범람에 관한 이론적 연구와 해일을 비롯한 각종 연안재해 방지 시스템 구축 등과 관련된 연구로 구분될 수 있는데, 전자로는 강용균(2004) 및 최병호 등(2004)의 연구가 있고 후자로는 이동영(2004) 등의 연구가 있다.

이러한 배경하에 본 연구에서는 Kang(1999) 및 Byun 등(2004)에서 부분적으로 규명한 목포해역의 조위변화를 토대로 군산해역과 목포해역에서 관측되고 있는 고극조위 증가 추세에 대한 원인을 구체적으로 규명하고자 하였다. 이를 위해 우선 이전연구(강주환 등, 2005b)에서 사용한 방법을 고극조위 분석에 적용하여 건설에 의한 급작스런 천문조 요소의 변화량과 기상변화에 의한 점진적인 비천문조 요소의 변화량을 분리함으로써 장래 해수면 변화 예측의 기틀을 마련하고자 하였다. 이와 함께 천문조와 기상조를 분리하여 결합 확률을 계산함으로써 비교적 정확하고 효율적인 빈도분석 방법을 목포항의 고극조위 산정에 적용하였다.

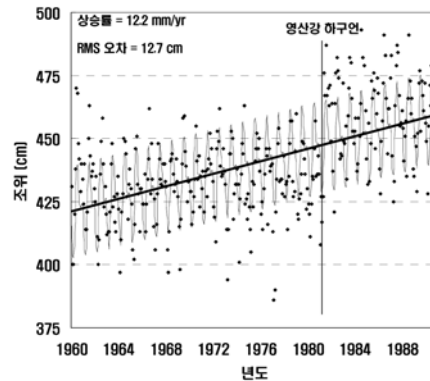
## 2. 장기적 변화요소에 의한 해수면 상승효과 분리

조위변화는 일주조, 반일주조 및 연주조 등과 같은 주기적인 변화와 각종 건설에 따른 급작스런 변화, 그리고 지구온난화에 기인한 점진적인 변화 등으로 구분된다. 주기적인 변화는 천문현상에 의한 것으로 해석적으로 충분히 파악되는 사항인 반면, 급작스런 변화는 수치모형 또는 수리모형을 통해 변화상을 추정할 수 있는 사항이다. 점진적인 변화는 축적된 자료의 한계와 장래 기후예측의 부정확성 및 국지적인 지반침하외의 구분이 어렵기 때문에 그 변화상을 파악 또는 예상하기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 선행연구(강주환 등, 2005b)에서와 동일한 방법으로 군산내항, 군산외항 및 목포항에서의 고극조위에 대해 다음 식 (1)과 같은 선형회귀분석을 통해 상기 세 가지 요소를 분리하였다.

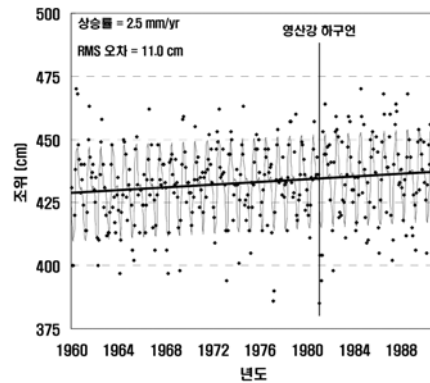
$$H(M) = a_0 + a_1M + c_{1c} \cos\left[\frac{2\pi M}{12}\right] + c_{1s} \sin\left[\frac{2\pi M}{12}\right] + c_{2c} \cos\left[\frac{2\pi M}{6}\right] + c_{2s} \sin\left[\frac{2\pi M}{6}\right] \quad (1)$$



(a) 월별 최고조위 변화



(b) 조정전 회귀분석 결과



(c) 23cm 조정후 회귀분석 결과

그림 1. 월별 최고조위 및 선형회귀분석

여기서  $H(M)$ 은 월별 최고조위이고, 우변의 각 계수들은 순차적으로 각각 장기적 평균치, 변화 기울기, 1년 및 6개월 주기의 진폭, 그리고  $M$ 은 월을 의미한다. 18.6년 주기는 선행연구 결과에서도 상대적으로 그 영향이 미미한 것으로 나타나 제외하였다. 각 지점의 매월 최고고조위 자료는 우변 마지막 4개항과 같이 연중 주기적 변화를 보이는 동시에 우변 2번째 항과 같이 점진적 변화를 보인다. 건설직후 야기되는 급작스런 변화값을 추출하기 위해 건설이후 기간에 해당되는 자료에 대해서만 일괄적으로 일정값을 가감한 후 전체 기간 자료에 대한 선형회귀분석을 시행하였다.

그림 1(a)에 보인 월별 최고조위 자료를 보면 하구언과 방조제 건설직후 상승 경향이 나타나고 있는데, 먼저 하구언에 의한 상승량을 추정하기 위한 절차는 다음과 같다. 즉, 그림 1(b)에 보인 목포항의 하구언 건설전후 기간(1960년~1990년) 자료에 대한 회귀분석 결과 RMS 오차는 12.7 cm 인데, 하구언 건설시점(1981년) 이후 자료에 대해서만 일괄

표 1. 장기적 변화요소에 의한 고극조위 상승률 및 구조물 건설 후 고극조위 변화량

		군산내항	군산외항	목포항
자료기간		45년(60-04)	24년(81-04)	45년(60-04)
장기적 변화	상승률	+8.9 mm/yr	+4.1 mm/yr	+2.9 mm/yr
	상승량	40 cm	10 cm	13 cm
구조물 건설	금강하구언	5 cm	2 cm	-
	영산강하구언	-	-	23 cm
	영암방조제	-	-	15 cm
	금호방조제	-	-	10 cm
총상승량		45 cm	12 cm	61 cm

적으로 23 cm(시행착오를 통해 결정된 값)를 감했을 때 RMS 오차는 11.0 cm로 최소를 보이고 있다. 따라서 하구언 건설에 따른 고극조위 상승량은 23 cm로 산정되었으며 식 (1)의  $a_1$  값에 해당되는 그림 1(c)의 기울기인 2.5 mm/yr를 하구언 건설전후 기간의 고극조위 상승률로 산정하였다. 그림 1(c)의 상태에서 영암방조제 건설후 자료에 대해 동일한 절차를 반복하면 영암방조제 건설에 따른 상승량과 하구언 건설전후 및 영암방조제 건설전후가 포함된 기간의 상승률을 재산정할 수 있고, 이를 금호방조제 건설후까지 적용하면 금호방조제 건설에 따른 상승량과 최종적인 전체 기간(1960년~2004년)의 상승률을 산정할 수 있게 된다.

이렇게 추출된 군산내항, 군산외항 및 목포항 등 세 지점의 고극조위 상승률의 시기별 변화와 건설에 따른 고극조위 변화를 표 1에 제시하였다. 이를 보면 금강하구언 건설에 따른 고극조위 상승량은 하구언에 인접한 군산내항과 외해쪽에 위치한 군산외항에서 각각 5 cm와 2 cm를 보이고 있으며, 장기적 변화요소에 의한 고극조위 상승률은 군산외항에서는 4.1 mm/yr인 반면 인접해 있는 군산내항에서는 8.9 mm/yr를 보이고 있다. 이는 과거 100년 동안의 전지구적 평균치인 1~2 mm/yr(Church 등, 2001)의 5배 이상이며, 90년대 이후의 가속화된 상승률 3.2 mm/yr(Cabanes 등, 2001) 및 윤용훈(2003)이 제시한 최근 한반도에서의 상승률

인 2.8 mm/yr보다도 훨씬 높은 값을 보이고 있어, 이전연구(강주환 등, 2005b)에서도 지적했듯이 군산내항 지역에서 지반침하가 진행되고 있는 것으로 추정된다. 동해의 높은 상승률이 열팽창에 주로 기인하고 있다는 연구결과(Kang, 2005)와 함께 높은 상승률을 보이고 있는 한반도 주변에 대해서는 심도있는 연구가 요망된다. 한편, 목포항에서는 지난 45년간 총 61 cm의 고극조위 상승이 발생하였는데, 장기적 변화요소에 의한 상승률이 2.9 mm/yr로서 상승량은 13 cm인 반면 하구언 및 방조제 건설에 의한 상승량은 총 48 cm로 장기적 변화요소에 의한 상승량을 훨씬 상회하는 것으로 파악되고 있다.

### 3. 조석확폭 및 해일환경 변화

#### 3.1 조석확폭 원인분석

2장의 결과에서 보듯이 군산해역과 목포해역 모두 하구언과 방조제 건설후 고극조위가 적지 않게 상승하였는데, 해당해역의 조차까지 감안하면 목포해역의 상승이 훨씬 큰 것으로 나타나고 있다. 목포해역의 고조위 상승은 목포해역과 외해를 연결하는 지점인 목포구의 'tidal choking effect(TCE)' 기능이 건설에 따라 약화되어 조석이 확폭된 것에 주로 기인하는 것으로 알려져 있다(강주환, 1996; Kang, 1999; Byun 등, 2004). 이 현상은 목포해역과 같이 입구가 좁은 반폐쇄성 만에서 발생할 수 있는 현상으로 금강하구언 건설에 따른 군산내항의 고조위 상승은 여기에 해당되지 않는다.

우선 관측치를 토대로 분석한 결과를 보면 표 2에 제시되어 있듯이 영산강하구언과 영암, 금호방조제 건설에 따라 고극조위의 기간별 평균값은 각각 32 cm, 14 cm, 16 cm 상승하여 총 62 cm 상승한 것으로 나타나 2장에서 제시한 61 cm와 유사한 값을 보이고 있다. 또한 평균고조위는 각각 10 cm, 12 cm, 3 cm 씩 총 25 cm 상승하였으며, M<sub>2</sub> 분조의 진폭은 각각 12 cm, 5 cm, 2 cm 씩 총 19 cm 증가된 것으로 나타나고 있다.

이러한 목포항에서의 조석확폭이 전적으로 목포구의 TCE 기능 상실에 기인하고 있는지를 확인하기 위한 수치실험을

표 2. 목포항의 건설기간별 조위변화

조 위 (cm)	기간				
	하구언 건설전 (1960-1980)	하구언 건설후 (1981-1990)	영암방조제 건설후 (1991-1993)	금호방조제 건설후 (1994-2004)	
최고고조위 (시기별 평균)	476 (460.2)	500 (492.4)	513 (506.3)	550 (522.2)	
연평균고조위	363.4	372.9	385.1	388.5	
평균해수면	240.3	240.4	243.1	238.9	
연평균저조위	75.5	61.7	64.4	59.5	
연최저저조위	-36.6	-69.5	-75.3	-80.2	
조화상수진폭	M <sub>2</sub>	123.1	135.5	140.0	141.8
	S <sub>2</sub>	37.5	44.6	46.9	48.0
	K <sub>1</sub>	31.6	31.7	30.9	30.7
	O <sub>1</sub>	24.9	24.8	23.5	23.5
수치실험 (M <sub>2</sub> )	실제	123.0	134.1	140.0	142.9
	가상	137.7	141.7	141.8	141.8

시행하였다. 수치실험은 경계조건으로  $M_2$  분조만을 부여한 상태에서 이전 연구(강주환 등, 2005a)와 동일한 수치실험 환경하에서 수행되었다. 단지, 그림 2에 보인 바와 같이 목포구와 중구 사이에 위치한 달리도를 제거함으로써 실제 폭이 약 600 m인 목포구 단면을 약 4500 m 폭으로 가상적으로 충분히 넓게 설정하여 목포구의 TCE 기능을 제거한 상태에서 건설에 따른 기상적 변화를 모의하였다. 먼저 목포구의 폭을 실제값으로 한 경우 표 2에서 보듯이  $M_2$  분조의 진폭이 건설에 따라 각각 11 cm, 6 cm, 3 cm로 총 20 cm 증폭된 것으로 나타나 관측결과와 유사한 결과를 보이고 있다. 그 반면 목포구를 넓게 설정한 기상적 실험결과는 하구인 건설에 따라  $M_2$  분조가 하구인 주변에서 4 cm 정도의 확폭에 그치고 있으며, 영암방조제와 금호방조제 건설에 따른 변화는 거의 나타나지 않고 있다. 이와 함께 확폭의 영향 범위도 목포구 내부 전 해역을 망라하고 있음을 볼 때, 목포항의 고조위 상승은 목포구의 TCE 기능의 상실에 주로 기인하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 Byun 등(2004)도 지적했듯이 입구가 좁은 수로를 통과하는 조석파는 단주기일수록 더욱 영향을 많이 받게 되므로 표 2에서 보듯이 반일주조의 증가가 일주조에 비해 더욱 크게 나타나고 있어 목포해역 조석확폭의 주원인이 여기에 있음을 반증하고 있다. 단지 영산강하구인 건설에 의한 고조위 상승은, 이러한 효과 외에 다음에 기술한 금강하구인의 경우와 유사한 효과가  $M_2$  분조의 경우 11~12 cm 중 4 cm 정도 포함된 것으로 추정된다.

목포해역과 달리 군산해역은 외해로 개방된 형태이기 때문에, 금강하구인에 의한 군산내항 부근의 고조위 상승의 원인은 목포해역과는 구분이 될 것이며, 실제로 영향범위를 보더라도 목포해역과는 달리 군산내항 부근 위주로 조석확폭이 발생하고 있다. 금강하구인 건설에 따른 군산내항의 고조위 상승 원인은 감소하천을 연결하는 수면곡선의 차단과 함께 반사파의 영향과 속도수두의 소멸로 인한 효과에 의한 것으로 추정되며, 이러한 추정은 차후 수치실험 및 수치실험을 통해 좀더 명확하게 규명될 필요가 있을 것이다.

### 3.2 해일환경 변화

TCE는 입구폭이 좁을수록 또 내부수역의 면적이 클수록 심화되는 것인데, 목포해역에서는 그림 2에 보인 바와 같이 하구인과 방조제 건설에 따라 목포구 내부수역의 면적이 대폭 감소된 바 있다. 이로 인해 목포구의 TCE 기능이 약화되어 조석확폭현상이 야기되었다. 목포해역은 조간대가 매우 발달되어 있어 저조시에 비해 조위가 높을수록 침수면적 역



그림 2. 목포해역

시 넓어지게 된다. 따라서 하구인과 방조제 건설후 초래된 목포구 내부수역의 면적 감소는 대조 또는 극조시에 더욱 커지게 되므로 조석확폭 역시 더욱 심화되는 현상을 보이고 있다. 건설이전 목포해역의 조위곡선은 그림 3에 도시된 실선의 조위곡선과 같이 창조 중간에 급격히 상승속도가 둔화되는 현상을 보이고 있었다(이석우, 1994). 이는 목포해역의 광활한 조간대에 기인하는 것으로서, 조간대가 침수되기 시작하는 시점부터 내부수역의 수면면적이 넓어지게 되어 상승속도가 둔화되기 때문이다. 그러나 하구인과 방조제 건설 이후 상당부분의 조간대가 목포구 내부수역으로부터 격리되어 육지화됨에 따라 이러한 현상이 거의 소멸되어 그림 3의 점선으로 표시된 조위곡선과 같이 고조위 상승이 뚜렷해진 양상을 보이게 된다. 이와 같은 조간대 효과에 의해 표 2에서 볼 수 있듯이 평균고조위 상승량에 비해 고극조위 상승량이 더욱 크게 나타나게 되며, 금호방조제까지 모두 건설된 후에는 목포구의 TCE 기능이 거의 소멸된 것으로 나타나고 있다.

즉, 영산강하구인 건설이전에, 조간대 효과에 의해 대조 또는 극조시 고조일수록 더욱 크게 작용하던 목포구의 TCE 기능이 외해로부터 유입되는 이상고조를 완충시키는 기능을 갖고 있었지만 현재는 그 기능이 거의 소멸된 상태가 된 것

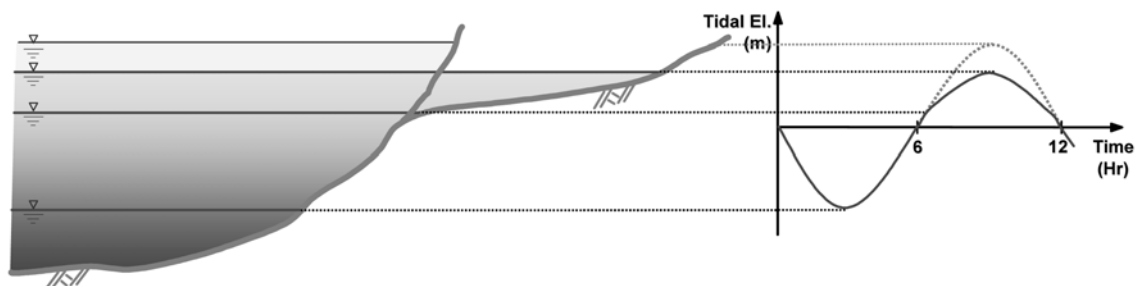


그림 3. 조간대 규모 축소에 따른 조위곡선형태의 변화

이다. 따라서 과거에는 목포구 외곽의 이상고조위에 비해 목포구 내부에 위치한 목포해역의 이상고조위가 낮게 형성되던 것이 이제는 목포구 내외부의 조위차 및 조시차가 거의 없어져서 외해에서 해일 발생시 목포해역에 직접적인 영향을 미치게 된 것이다. 표 2의 건설후 연평균 최고고조위의 상승이 연평균 고조위의 상승보다 더욱 크게 나타난 것도 이러한 사항을 뒷받침하고 있으며, 이에 대한 추가적인 근거는 다음과 같다.

1960년부터 영암방조제 건설이전인 1990년까지 31년 동안 목포항과 군산항에서 연최고고조위가 동시에 발생한 경우는 겨우 6번(6/31, 19%)에 지나지 않았지만 1991년 이후 14년 동안에는 무려 11차례(11/14, 79%)나 동시에 발생하고 있다(목포시, 2005). 즉, 과거에는 황해에 유입된 이상고조로 인해 군산해역에서는 고극조위가 발생하더라도 목포구의 TCE 기능, 즉 해일원충 기능에 의해 목포해역에서는 고극조위가 발생치 않는 경우가 빈번했던 것으로 해석된다. 그러나 하구언과 방조제 건설후 목포구의 이러한 기능이 소멸된 후에는 황해로 유입된 이상고조가 군산해역 뿐 아니라 목포해역에서도 동시에 영향을 미치는 상황이 된 것으로 파악된다. 특히 1997년 8월 19-21일 기간 중 백중사리와 제 13호 태풍 위니의 간접 영향이 겹쳐 서해안에서 30-80 cm의 해일을 야기시켜 목포항을 비롯한 서해안에 위치한 대부분의 검조소에서 기왕최고극조위를 기록하게 되었다(최병호, 2004). 또한 2004년 7월 4일에는 태풍 민들레의 영향으로 목포항과 군산항에서 최고조위가 동시에 발생한 바 있으며, 이 때 목포항의 기왕최고극조위는 7년만에 또다시 경신되는 상황을 맞게 되었다. 이와 같이 최근 들어 목포해역에서는 이상기후에 따른 태풍발생의 증가 및 전지구적 평균해수면 상승 등 기상학적 요소에 부가하여, 조석확폭과 조간대 효과 등의 고극조위 상승 요인으로 인해 이상고조가 빈번히 관측되고 있는 등 해일환경에 적지 않은 변화가 초래되었다.

#### 4. 고극조위 빈도분석

##### 4.1 확률분포함수를 이용한 연고극조위 빈도분석

2장과 3장에서 살펴본 바와 같이 군산해역과 목포해역 모두 전지구적 해수면상승과 함께 하구언과 같은 해안구조물 건설에 따라 조석 및 해일환경에 변화가 야기된 바 있다. 이러한 곳에서는 각종 항만 시설물의 천단고가 재산정되어야 하는데, 빈도별 설계조위를 산정하기 위한 방법으로 가장 널리 사용되는 방법 중 하나가 확률분포함수를 이용하는 방법이다. 이 방법은 연별 최고조위 자료에 대한 확률분포곡선을 작성한 후 이로부터 외삽법으로 임의의 재현기간에 대한 조위를 구하는 방법이다. 그러나 이 방법을 적용하기 위해서는 자료의 동질성이 보장되어야 함은 물론이고, 최소 25년 이상의 자료가 필요하며 자료기간의 4배 이내에서 외삽이 이루어져야 한다(Pugh, 2004). 또한 이 방법은 1년에 1개의 자료만을 대상으로 하기에 자료의 낭비가 매우 심한 방법일 뿐 아니라 큰 규모의 기상조가 소조시 발생할 경우 결과에 전혀 반영되지 않는다는 단점이 있다.

해일환경에 변화가 발생하게 되자 목포시에서는 빈도별 고극조위를 재산정할 필요성이 대두되었다. 이에 따라 목포시

표 3. 확률분포함수를 이용한 목포항의 빈도별 고극조위

구분	기간	빈도별 고극조위 (cm)			
		10년	20년	50년	100년
해양수산청 (1998)	1962-1997	-	519	529	536
	1981-1997	-	525	531	535
행정자치부 (1998)	1981-1997	-	530	536	541
선행연구 (2000)	1962-1999	538	541	544	546
본 연구	1960-2004	539	542	546	549

방해양수산청(1998)과 행정자치부(1998)는 방조제 건설에 따른 자료의 이질성을 무시하고 동질한 자료로 간주한 후 확률분포함수 방법으로 빈도분석을 시행하였지만, 자료 자체의 문제 때문에 그 결과는 신빙성이 매우 낮을 수 밖에 없었다. 이러한 단점을 보완하기 위해 강주환 등(2000)은 금호방조제 건설이전 자료에 대하여 수치모형을 이용해 과거 고극조위를 유발한 환경을 현재상태로 재현시키는 방법을 적용하여 과거값을 현재값으로 변환시켜 동질한 자료로 가공한 후 고극조위를 산정한 바 있다.

본 연구에서는 2000년 이후의 자료를 추가한 후 강주환 등(2000)에서 적용한 방법과 동일한 방법으로 빈도분석을 시행하였으며 산정된 값을 2004년 12월 현재의 기본수준면(2003년 8월에 6 cm 상향 조정되었음)을 감안하여 앞에 소개한 과업결과와 함께 표 3에 제시하였다. 2004년에 발생한 기왕최고극조위인 550 cm는 앞선 두 연구에 따르면 100년 빈도를 훨씬 초과하고 있는데 비해 개선된 방법에 의하면 100년 빈도를 보이고 있다.

그러나 이렇게 얻어진 결과 자체도 과거자료를 수치모형을 이용해 현재자료로 치환시킨 자료로서 다소간의 오차를 내포하고 있을 것이며 정확한 고극조위 산정을 위해서는 향후 자료축적이 충분히 이루어진 후이나 가능하게 될 것이다. 특히 목포구의 TCE 기능이 소멸되어 외해에서의 이상고조가 과거와는 달리 목포항에 직접적인 영향을 미치고 있음과 전지구적 해수면 상승을 감안할 때 전술한 고극조위는 더욱 증가할 가능성이 있다.

##### 4.2 조위편차 빈도분석

본 연구에서는 확률분포함수를 사용한 방법 외에도 현재상태인 금호방조제 건설후의 단기간 자료로부터 빈도분석을 할 수 있는 방법을 적용하였다. 시도한 방법은 천문조와 기상조를 분리한 후 조위편차(기상조)에 대한 확률통계적 해석을 통한 빈도분석 방법이다. 이 방법은 앞선 방법이 해당연도의 연최고고조위만을 자료로 취하는 것과는 달리 매 고조위 자료를 모두 이용하기 때문에 정보의 손실이 거의 없고 5년 이내의 짧은 기간 동안의 자료만 갖고도 해석이 가능한 방법이다. 또한 확률분포를 근거로 한 외삽법을 도입하지 않는다는 점과 저조시의 확률도 계산이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 이 방법을 사용하기 위해서는 자료의 질이 양호해야 하는 동시에 최고조위를 정확히 추출해야 하기 때문에 수분 이내의 고조 발생시각에 대한 시간적 정확성이 요구된다.

본 방법을 적용하기 위해서는 조위 예측치와 관측치의 차

표 4. 건설시기별 고조시 예측조위 및 조위편차 발생분포

최대예측 조위(cm)	하구언이전 (75~80)	하구언이후 (84~90)	금호이후 (00~04)	최대조위 편차(cm)	하구언이전 (75~80)	하구언이후 (84~90)	금호이후 (00~04)
525			2(527)*	55			1(55)*
520			3	50		1(51)*	0
515			7	45		1	1
510			16	40		0	3
505			14	35	4(38)*	4	4
500			14	30	4	11	23
495			27	25	17	31	29
490			27	20	68	68	88
485			28	15	184	188	176
480		2(483)*	30	10	358	317	367
475		4	41	5	518	537	575
470		14	53	0	714	698	726
465		25	46	-5	674	694	651
460		26	53	-10	510	495	439
455		37	78	-15	287	261	235
450	2(451)*	43	60	-20	112	128	119
445	6	44	74	-25	48	49	39
440	21	57	99	-30	14	23	26
435	28	58	90	-35	8	9	11
430	42	49	104	-40	5	3	7
425	37	68	106	-45	4	4	6
420	63	91	111	-50		4	3
415	81	94	102	-55		1	1
~410	3,095	2,700	2,151	-60		1	
계	3,529	3,528	3,530	계	3,529	3,528	3,530

\*(최대값)

이인 조위편차를 구해야 하는데, 해양조사원에서 공개하는 조위 예보치 자료는 직전년 이전의 자료로부터 조화분석을 통해 추출한 조화상수를 사용하여 예측한 것으로서 해당연도의 천문조를 정확히 구현했다고는 볼 수 없다. 따라서 본 연구에서는 매년 조화분석을 별도로 시행하여 해당연도의 103개 조화상수를 추출한 후 이를 통해 해당연도의 천문조를 사후 추정하여 조위 예측치로 산정함으로써 조위편차에 대한 정확도를 도모하였다. 또한 1시간 간격으로 제시되어 있는 조위자료로부터 고조위 값을 추출하였기 때문에, 이로부터 얻은 고조위는 엄밀하게 침두값이라고 볼 수 없다. 따라서 자료의 질적 수준을 높이기 위해 고조위 주변의 3개 값을 2차 함수를 이용한 내삽법을 통해 계산되는 극대값을 고조위 관측치로 산정하였다. 이렇게 산정된 매 고조시 조위 예측치와 관측치의 차이로부터 조위편차를 계산하였다. 표 4는 건설시기별 매 고조시 예측조위의 발생분포와 조위편차 발생분포를 나타낸 것으로, 1982년 20 cm 및 2003년 6 cm 각각 상향 조정된 목포 검조소 기본수준면 변화를 고려해 현재상태로 환산한 결과이다.

빈도분석을 하기에 앞서 이렇게 계산된 예측조위와 조위편차의 건설시기별 변화를 살펴보면, 하구언 건설이후 예측조위의 최대치가 32 cm나 높아졌으며 금호방조제 건설이후에

는 추가로 44 cm나 더 상승하여 총 76 cm 상승된 527 cm의 예측조위도 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 하구언 건설이후의 조위편차를 보면 건설이전에 비해 30 cm 이상에 해당하는 조위편차의 빈도가 다소 증가하고 있으며, 이는 금호방조제 건설이후에 더욱 증가한 결과를 보이고 있다. 특히 하구언 건설이전에는 볼 수 없었던 40 cm 이상의 조위편차가 여러 번 관측되고 있는 등 과거에 비해 높은 해일고가 자주 발생하고 있음을 볼 수 있다.

조위편차를 이용한 빈도분석을 위해 먼저 금호방조제 건설이후 기간 중 최근 자료인 2000년 1월부터 2004년 12월까지의 자료로부터 매 조석 주기별로 고조시 조위 관측치와 조위 예측치를 각각 1개씩 추출하여 총 3,530개씩의 자료를 수집하였다. 이렇게 구한 고조시 조위 예측치와 조위편차에 대한 결합확률로부터 재현기간을 계산하였다. 실제로는 양 자료를 1 cm 간격으로 분석하였지만, 5 cm 간격에 대한 예를 들면 총 3,530개의 자료 중 5년간 가장 높은 예측조위는 표 4를 참조하면 525 cm로서 2회 발생하였고 그 다음으로 520 cm, 515 cm, 510 cm 등이 각각 3회, 7회 및 16회 발생한 바 있다. 따라서 임의의 고조시에 예측조위가 510 cm 이상일 확률은 28/3530이 될 것이다. 마찬가지로 표 4에서 보듯이 조위편차의 최대값은 55 cm로서 1회 발생하였

표 5. 조위편차와 조위예측치의 결합확률

	조위편차	55	50	45	40	35
예측조위	발생확률	1/3530	0/3530	1/3530	3/3530	4/3530
525	2/3530	<b>2/(3530*3530)</b>	<b>0/(3530*3530)</b>	<b>2/(3530*3530)</b>	<b>6/(3530*3530)</b>	8/(3530*3530)
520	3/3530	<b>3/(3530*3530)</b>	<b>0/(3530*3530)</b>	<b>3/(3530*3530)</b>	9/(3530*3530)	12/(3530*3530)
515	7/3530	<b>7/(3530*3530)</b>	<b>0/(3530*3530)</b>	7/(3530*3530)	21/(3530*3530)	28/(3530*3530)
510	16/3530	<b>16/(3530*3530)</b>	0/(3530*3530)	16/(3530*3530)	48/(3530*3530)	64/(3530*3530)
505	14/3530	14/(3530*3530)	0/(3530*3530)	14/(3530*3530)	42/(3530*3530)	56/(3530*3530)

표 6. 조위편차를 고려한 목포항 빈도별 고극조위 (cm)

빈도(년)	하구언 건설이전	하구언 건설이후	금호방조제 건설이후
10	467	499	544
20	470	503	548
50	474	507	553
100	477	512	557

고 50 cm는 발생하지 않았으며 45 cm 및 40 cm가 각각 1회 및 3회 발생한 바 있다. 그러므로 임의의 고조시에 조위편차가 40 cm 이상일 확률은 5/3530가 될 것이다. 그러면 관측조위가 580 cm 이상일 확률을 따져보면 예측조위가 525 cm 이상인 동시에 조위편차도 55 cm 이상에 해당되는 확률로서 표 5에 보인 바와 같이 2/(3530\*3530)가 되며 이 값의 역수인 623만번의 고조마다 한번 정도 발생하게 되므로 이를 년으로 환산하면 재현기간은 약 8,800년이 된다. 반면 관측조위가 565 cm 이상일 경우는 예측조위와 조위편차의 조합이 표 5에서 진하게 표시된 부분에 해당되며 그 확률은 39/(3530\*3530)가 되며 32만번의 고조마다 한번씩 발생하므로 재현기간은 약 450년 정도가 된다. 이러한 방법으로 산정하되 1 cm 간격으로 분석한 목포항의 빈도분석 결과를 하구언 건설이전(1975-1980; 1979 결측), 영암방조제 이전(1984-1990; 1986, 1988 결측) 및 금호방조제 이후(2000-2004)로 구분하여 표 6에 제시하였다.

이상과 같은 조위편차를 이용한 빈도분석결과를 보면 하구언 건설이전에는 100년 빈도가 477 cm에 불과하던 것이 현재 상태는 10년 빈도가 544 cm이고 100년 빈도는 557 cm에 이르고 있으며, 설계기준으로 주로 활용되는 50년 빈도값도 하구언 건설이전 474 cm에서 79 cm가 상승된 553 cm에 달하고 있는 것으로 산정되었다. 이와 같이 목포해역이 이상고조 발생빈도가 높아진 구조로 변화된 것을 구체적으로 확인할 수 있으며, 여기에 2장에서 언급된 장기적 고극조위 상승률을 감안할 때 차후 이 수치는 더욱 높아질 가능성이 있다. 또한 표 3의 확률분포함수를 이용한 빈도분석 결과와 비교해 보면, 100년 빈도로 산정된 549 cm가 조위편차 빈도분석 결과에서는 20년 빈도 정도로 산정되는 등 빈도별 고조위가 적지 않게 증가하였음을 알 수 있다. 또한 양 방법의 결과 차이가 10년 빈도에서는 5 cm(544 cm-539 cm)에 불과하지만 100년 빈도에서는 8 cm(557 cm-549 cm)의 차이가 나는 등 고빈도로 갈수록 본 결과가 더욱 커짐을 볼 수 있다. 그 원인은 앞서 언급한대로 전절의 결과에는 조간대 효과가 충분히 반영되지 않아 높은 조위일수록 오차가 많게

됨에 주로 기인하는 동시에, 금호방조제 건설이후 조위편차가 적지 않게 증가하였음에도 원인이 있는 것으로 판단된다.

확률분포함수를 이용한 기존 빈도분석 방법에서는 25년 이상의 동질한 연최고고조위 자료(1년에 1개)가 필요하기 때문에 조석환경변화가 발생하여 장기간의 동질한 자료 확보가 어려운 곳에서는 이 방법을 그대로 적용할 수 없게 된다. 이런 곳에서 조위편차를 이용하는 본 방법을 사용하면 5년 정도의 고조위 자료(1년에 약 700개)로부터 자료 낭비 없이 훨씬 정확하고 효율적인 빈도분석이 가능하게 된다. 앞서 언급한 바 있듯이 목포항의 기왕최고고조위 550 cm는 확률분포함수를 이용한 기존 연구(목포지방해양수산청, 1988; 행정자치부, 1988)에서는 수백년 빈도에 해당되며, 본 연구에서 이를 개선시킨 방법에서도 100년 빈도 정도임에 비해, 조위편차를 이용한 본 방법에서는 30년 빈도 정도로 평가되고 있어 보다 현실적이고 정확한 방법임을 시사하고 있다.

## 5. 결 론

하구언이나 방조제와 같은 인공 구조물 건설로 인한 고극조위 변화상을 파악하기 위해 선형회귀분석방법을 사용하여 장기적 변화요소로 인한 고극조위 상승량을 분리하였다. 금강하구언 건설에 따른 상승량은 군산내항과 군산외항에서 각각 5 cm와 2 cm로 산정되었고 지구온난화 효과를 포함한 장기적 변화요소로 인한 상승량은 내항과 외항에서 각각 45년간 40 cm 및 24년간 10 cm로 군산내항에서 특히 매우 심하게 나타나고 있어 군산내항 지역의 지반침하가 진행되고 있는 것으로 추정된다. 목포항에서는 건설에 의한 상승량이 48 cm, 장기적 변화요소로 인한 상승량이 45년간 13 cm로 총 61 cm의 상승을 보이고 있다.

목포해역을 대상으로 M<sub>2</sub> 분조의 변화상에 관한 수치실험 결과 영산강 하구언과 영암 및 금호 방조제 건설로 인한 조석확폭현상은 주로 목포구의 TCE 기능의 소멸로 인해 발생한 것으로 확인되었다. 하구언과 방조제 내부수역은 원래 조간대가 매우 발달된 곳을 감안할 때 이들 해역이 목포구 내부수역에서 제외된 이후 조간대 효과가 감소함에 따라 조석확폭현상은 대조 또는 극조시 더욱 크게 작용하게 된다. 따라서 목포구의 TCE 기능 소멸로 인한 목포해역의 조석환경변화는 이상고조 발생시 더욱 크게 나타나며 이는 목포해역의 해일 위험성이 크게 높아진 결과를 초래하고 있다.

조석환경변화를 수반하기 때문에 건설전후의 고극조위 자료는 동질성을 상실하게 된다. 이러한 상황에 적합한 빈도분석 방법으로 천문조와 기상조를 구분하여 조위편차를 구한

후 확률해석을 통해 빈도분석을 시행하는 방법이 있다. 이 방법을 목포항에 적용함으로써 각 건설시기별 짧은 기간의 자료로부터 빈도별 고극조위를 산정할 수 있었다. 건설에 따라 천문조가 크게 증가했을 뿐 아니라 해일고를 나타내는 조위편차도 다소 증가하여 건설에 따른 빈도별 고극조위의 증가를 보이고 있다. 이에 따라 50년 빈도 조위값이 하구언 이전에 474 cm에 불과하던 것이 금호방조제 건설이후인 현재 상태에는 79 cm 상승된 553 cm로 산정되고 있다.

건설이후 변화된 조석환경에 적합한 항만시설물의 진단고를 재산정할 경우 본 연구에서 수행한 연구내용이 감안될 수 있을 것이다. 즉, 본 연구에서는 건설이후 기간이 짧은 경우에도 효율적으로 빈도별 설계조위를 구할 수 있는 방법을 제시하였고, 여기에 장기적 조위변동 요소를 감안하면 최종적으로 합리적인 설계조위면을 결정할 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2005년도 한국대학교육협의회 대학교수 국내교류 연구비 지원에 의한 것임. 또한 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10164-0)지원에 의한 결과도 일부 포함되어 있음.

### 참고문헌

강용균 (2004) 태풍 ‘매미’ 통과시의 해일공명. **한반도 해역의 고파, 폭풍해일**, 한국해양·해양공학회 특별 Workshop. pp. 57-62.

강주환(1996) 하구언 및 방조제 건설에 따른 목포해역의 환경변화. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제16권 제II-6호. pp. 611-619.

강주환, 문승록(2000) 조석환경변화를 고려한 목포항의 고극조위 산정. **한국해양·해양공학회지**, 한국해양·해양공학회, 제12권 제4호. pp. 203-209.

강주환, 문승록, 박선중(2005a) 조석확폭에 수반되는 조건대 영역 확대의 영향성. **한국해양·해양공학회지**, 한국해양·해양공학회, 제17권 제1호. pp. 47-54.

강주환, 문승록, 오남선(2005b) 서남해안의 해수면 상승. **대한토**

**목학회 논문집**, 대한토목학회, 제25권 제2B호. pp. 151-157.

목포시(2005) **목포시 지역방재계획 학술연구용역 보고서**.

목포지방해양수산청(1998) **목포항 수리현상 조사 및 방재대책 수립 보고서**.

윤용훈(2003) **Climate variability of sea level and air temperature around Korean peninsula**. 박사학위논문, 서울대학교.

이동영(2004) 연안 해일재해 예측 시스템 구축 및 연안 재해방지. **한반도 해역의 고파, 폭풍해일**, 한국해양·해양공학회 특별 Workshop. pp. 63-66.

이석우(1994) **한국항만수리지**, 집문당. pp. 93-116.

최병호(2004) 우리나라 서해안의 최고극조위. **한반도 해역의 고파, 폭풍해일**, 한국해양·해양공학회 특별 Workshop. pp. 145-154.

최병호, 엄현민, 김현승, 정원무, 심재철(2004) Wave-tide-surge coupled simulation for typhoon Maemi. **한반도 해역의 고파, 폭풍해일**, 한국해양·해양공학회 특별 Workshop. pp. 121-144.

행정자치부(1998) **서해안 해수범람 흔적조사 및 종합대책 수립 보고서**.

Byun, D.S., Wang, X.H., and Holloway, P.E. (2004) Tidal characteristic adjustment due to dyke and seawall construction in the Mokpo coastal zone. Korea, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Vol. 59. pp. 185-196.

Cabanes, C., Cazenave, A., and Le Provost, C. (2001) Sea level rise during past 40 years determined from satellite and in situ observations. *Science*, Vol. 294, pp. 840-842.

Church, J.A., Gregory, J.M., Huybrechts, P., Kuhn, M., Lambeck, K., Nhuan, M.T., Qin, D., and Woodworth, P.L. (2001) Changes in sea level. In *Climate change 2001: the scientific basis*, Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, p. 881.

Kang, J.W. (1999) Changes in tidal characteristics as a result of the construction of sea-dike/sea-walls in the Mokpo coastal zone in Korea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Vol. 48, No. 4. pp. 429-438.

Kang, S.K. (2005) Patterns of recent sea level rise in the East/Japan Sea from satellite altimetry and in situ data. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 110, C07002. pp. 1-10.

Pugh, D. (2004) *Changing sea levels*. Cambridge, pp. 180-207.

(접수일:2005.8.16/심사일:2005.10.5/심사완료일:2005.10.30)