

## 서 · 남해안 조석-해일 비선형성 발생양상 Appearance of Tide-surge Interaction along the West/South Coasts

강주환\* · 김양선\* · 윤영관\* · 심재설\*\*

Ju Whan Kang\*, Yang-Seon Kim\*, Young-Kwan Yoon\* and Jae-Seol Shim\*\*

**요지** : 국내 서해안과 남해안의 조위자료로부터 조석-해일 비선형효과에 대한 발생실태를 조사한 결과 부산을 제외한 모든 해역에서 비선형성이 확인되고 있으며 특히 목포 및 완도를 중심으로 한 서남해안에서 두드러지게 나타나고 있다. 대규모 해일이 드물기 때문에 창조집중에 대한 사례는 흔치 않은 반면 저조시 조위편차가 커지는 조석변조해일은 빈번하게 발생하고 있다. 또한 낙조우세가 심한 목포해역의 경우 새로운 형태의 조석-해일 비선형성에 의해 낙조시 해일고가 크게 나타나는 현상을 확인하였다. 조위편차 산정과정에서 비선형성과 관련된 오류를 해소하는 방안으로 편기해일고 산정방법에 대해서도 검토하였다.

**핵심용어** : 조석-해일 비선형성, 위상오차, 조석변조해일, 낙조우세, 편기해일고

**Abstract** : Hourly tide-gauge data at 10 tide stations along the West/South coasts were analysed statistically for tide-surge interaction. Interactions were found at all stations except Busan, prominently at the western tip of the South coast near Mokpo and Wando. A well-known interaction pattern which occurs at flood tide was found rarely at domestic coasts, while another pattern of the tide-modulated surge which occurs at low tide was detected frequently. In addition, a new interaction pattern which occurs at ebb tide is discovered. This pattern is found at Mokpo where the ebb dominance is prominent. Finally, the skew surge could be considered as a tool coping with such interactions.

**Keywords** : tide-surge interaction, phase error, tide-modulated surge, ebb dominance, skew surge

### 1. 서 론

조위 관측치와 예측치의 차이를 조위편차 또는 해일고라 하며 전적으로 기상학적 요인에 의해 발생하는 것으로 간주되어 왔다. 그러나 대규모 해일이 주로 창조시에 발생하는 경향(Rossiter, 1961)이 확인된 이후 해일발생의 조석과의 상관성이 다각도로 연구되고 있다. Olbert and Harnett(2010)은 해일이 조석에너지 전파에 미치는 영향은 분명하지만 조석이 해일에 미치는 영향은 불명확하다고 하였지만, Horsburgh and Wilson(2007)은 조차가 커질수록 해일의 첨두치는 고조와 어긋나는 경향이 있음을 확인하여 조석이 해일에 영향을 미치고 있음을 밝힌 바 있다. 또한 Bernier and Thompson(2007)은 해일의 진동현상이 조석-해일 상호작용 및 비선형 바다파찰에 기인하고 있음을 적시하고 있다.

이와 같이 국외에서 조석-해일 비선형효과에 대한 연구는 매우 다양하게 진행되고 있는 반면 국내 연구는 다소 미흡한 실정이다. Park et al.(2010)이 조석-해일 결합모형 적용을 통해 조석이 작용하는 해역에서 해일고 크기가 영향을 받음을

밝힌 바 있고, Park and Suh(2012)가 ADCIRC 모형을 태풍 모의에 적용하여 조위변화에 따라 해일고 발생이 달라지고 있어 대조기 고조시에 조위와 해일고를 단순히 합하는 것은 총 조위를 과대산정하게 된다고 기술한 바 있다. 그러나 Brown et al.(2010)은 조석-해일 비선형효과에 의해 해일고가 증가할 수도 있음을 피력한 바 있으며, 비선형효과가 총수위에 미치는 영향성은 사상에 따라 천차만별이어서 고조위와의 위상과 관련하여 다양한 평가가 요구된다. 최근에는 Kang et al.(2013a; 2013b)이 조석성분이 제거된 조위편차 내에 조석성분이 어느 정도 남아 있으며, 이러한 조위편차가 해역별로 구분되는 특성을 내포하고 있음을 서술하고 있다. 또한 Seo and Kim(2014)이 태풍 Bolaven(1215) 경로상의 해일발생양상을 연구한 결과 저조시의 낮은 수심에서 매우 높은 해일고가 발생한 사례에 대하여 기술한 바 있다.

이러한 기존연구를 토대로 본 연구에서는 조위자료를 분석하여 국내에서 조석-해일 비선형 효과 발생의 실태를 정량적으로 파악하는 동시에 비선형 효과의 작용기작에 대한 규명을 시도하였다.

\*목포대학교 토목공학과 (Corresponding author : Ju Whan Kang, Dept. of Civil Engineering, Mokpo National University, Muan-gun, Jeonnam 534-729, Korea, jwkang@mokpo.ac.kr)

\*\*한국해양과학기술원 특성화연구본부, 책임연구원 (Operational Ocean Science and Technology Department, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

## 2. 조위편차의 발생 및 특성

### 2.1 조위편차 발생

해면고는 평균해수면과 천문조(astronomical tide) 및 기상조(meteorological tide)의 합으로 구성된다(Pugh, 1987). 따라서 해면고에서 평균해수면 성분과 천문조 성분을 제외시키면 기상조 성분만 남게 되며 이를 조위편차(tide residual)라 한다. 그러나 천문조 성분을 완벽하게 추출하여 제외시킬 수 없기 때문에 조위편차 내에 천문조 성분이 어느 정도 남아있게 된다. 해일고(surge height)는 기상조 만을 지칭함에 반해 조위편차는 기상조를 비롯해 조석-해일 비선형 및 조석예측 오차 등과 같은 조석관련 성분을 모두 포함한 값, 즉 조위 관측치와 예측치의 차를 일컫는다(Horsburgh and Wilson, 2007). 이와 같이 조위편차 내에 기상조 성분 뿐 아니라 조석성분도 포함되어 있으므로 기상조 성분을 해일고 또는 해일잔차(surge residual)라 칭하고 남아 있는 조석성분을 조석잔차(tide induced residual)라 명명하고자 한다. 즉 조위편차는 해일잔차와 조석잔차의 합으로 구성되어 있으나 이들을 정량적으로 분리하기는 매우 어려운 실정이다. 보통 조석잔차는 무시되고 있으며 이에 따라 조위편차와 해일고가 구분 없이 사용되고 있다.

조석과의 관련성 및 주로 조석예측오차에 기인(Kang et al., 2013a)하고 있기 때문에 조석잔차는 조차가 클수록 크게 발생하는 경향이 있어 서해안에서 평균 7 cm 정도의 크기를 보이는 반면 동해안에서는 1 cm 정도에 불과하다(Kang et al., 2013b).

### 2.2 조석-해일 비선형성

조차가 크고 수심이 얇은 해역에서는 다음에 설명하는 바와 같은 조석-해일 비선형성이 발생할 수 있다.

#### 1) 위상오차

조석이 우세한 해역에서 최대조위편차가 고조시 발생하는 경우가 드물고 창조시에 주로 집중되는 현상에 대하여 Rossiter(1961) 및 McInnes and Hubbert(2003) 등은 그 원인이 위상오차에 기인하고 있음을 밝힌 바 있다. 즉, 양의 해일은 수심증가에 따라 파속 역시 증가시켜 조석파가 일찍 도달하게 하는 효과를 야기한다. 이에 따라 Fig. 1에 보인 바와 같이 천문조만 있는 경우에 비해 특히 창조시 양의 해일을 더욱 크게 유발하게 되는 소위 창조집중이 나타나게 된다. 동일한 원인에 의해 음의 해일은 조석파를 늦춰 낙조시 양의 해일이 발생할 수 있다.

이와 같이 해일발생에 따른 수심변화에 의해 조석파와의 위상차가 발생하여 창조시(해일고 또는 해일잔차가 아닌) 조석잔차가 유발될 수 있다. 또한 조석관측 및 조석예측이 정확치 않을 경우(Flowerdew et al., 2010), 특히 분조별 지각에 내재하는 오차가 심할 경우 Fig. 1과 유사하게 창조 또는

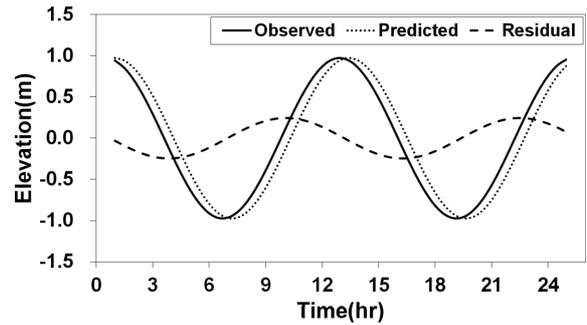


Fig. 1. An interaction pattern which occurs at flood tide.

낙조시 조위편차가 크게 나타나게 된다. 따라서 천문조성분이 제거된 조위편차자료에 대한 웨이블릿분석이나 FFT(fast Fourier transform)분석을 시행할 경우 천문조 주기의 값이 활성화되고 있음을 볼 수 있다(Kang et al., 2013a; 2013b).

#### 2) 조석변조해일

Horsburgh and Wilson(2007)이 영국의 Sheerness 자료를 통해 해석한 결과를 보면 조위편차가 가장 빈번하게 발생하는 시점은 저조와 창조 중간 정도로 나타나고 있다. 식 (1)(Pugh, 1987)에 제시한 바와 같이 수면의 기울기는 수심에 반비례하기 때문에 저조시 조위편차가 가장 크게 나타나게 되며 천해역에서 특히 뚜렷하게 나타난다. 이와 같이 Horsburgh and Wilson(2007)은 창조집중에 부가하여 조석변조해일(tidally modulated surge) 현상과 관련된 조석-해일 비선형효과를 규명한 바 있다.

$$\partial \eta / \partial x = CW^2 / D \quad (1)$$

여기서 좌변은 수면기울기,  $C$ 는 항력계수,  $W$ 는 풍속,  $D$ 는 총수심을 의미한다.

## 3. 자료분석

### 3.1 국내연안 비선형성 조사

Kang et al.(2013a)은 목포조위관측소 자료에 대한 웨이블릿 분리결과 중 단주기 성분이 증폭되는 시기를 선정한 후 주기별 성분에 대한 분석을 시행한 바 있다. 그 결과 12시간 이내 주기성분의 극대값이 주로 저조나 낙조시에 집중되는 경향이 있었고 진폭이 극대화된 1일 주기 역시 창조나 저조시에 집중되어 고조시 조위편차에 비해 창조나 저조시 조위편차가 매우 크게 형성되고 있어 조석이 해일발생에 영향을 미치고 있음을 정성적인 사례분석을 통해 밝힌 바 있다.

이러한 조석-해일 비선형성의 국내현황을 정량적으로 파악하기 위하여 인천, 안흥, 군산, 목포 등 서해안 4개 조위관측소와 추자도, 제주, 완도, 여수, 통영, 부산 등 남해안 6개 조위관측소 등 총 10개 지점을 선택하여 분석을 시행하였다. 국내 관측소 전체적으로 결측치가 가장 적은 2001~2005년의 1

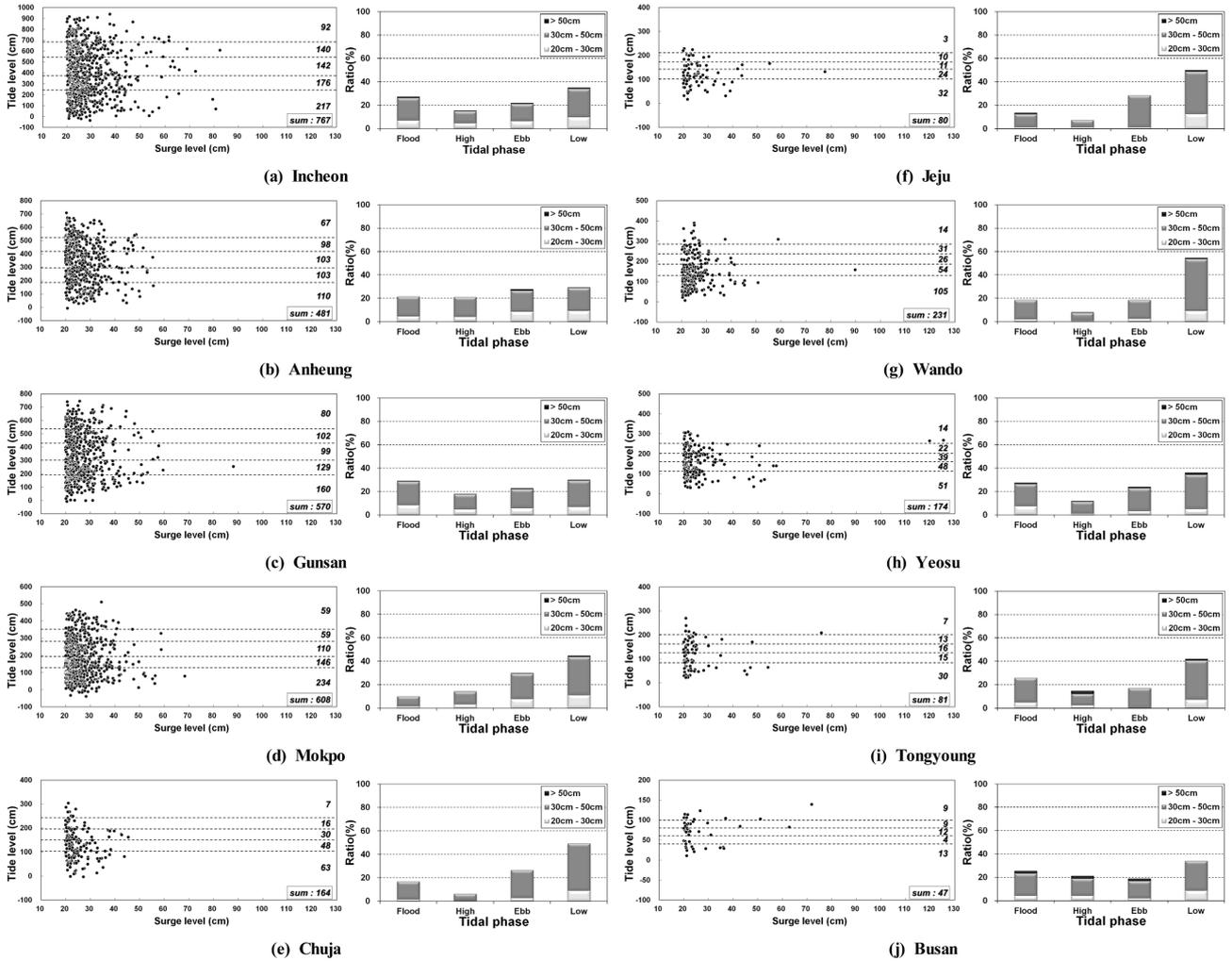


Fig. 2. Surge peaks above 20 cm plotted with respect to tidal heights and tidal phase.

시간 조위자료(Cho et al., 2011)를 선택하여 분석하였는데, 몇몇 태풍의 경우를 제외한 거의 대부분 자료가 계절풍에 기인한 것이기에 연별변화가 크지 않을 것으로 판단되어 양질의 5년간 자료만을 분석대상으로 선정하였다.

상기 조위자료에 대한 조화분석을 통해 관측치와 예측치의 차이인 조위편차를 산정하였다. 이 중 20 cm 이상의 양의 조위편차만을 대상으로 하였으며 조위별 및 조시별로 구분하여 정리하였다. 먼저 조위별로 발생빈도가 균등하게 5개 구간으로 구분한 후 모든 조위편차자료를 발생당시 조위와 함께 Fig. 2에 도시하였다. 또한 동일한 자료에 대하여 조시별 발생양상 역시 함께 도시하였다. 조시별 발생양상을 파악하기 위해 각각의 최대조위편차 시점과 가장 가까운 고조시점 및 저조시점을 이차내삽법(quadratic interpolation)으로 찾아낸 다음 고조시점과 저조시점 사이를 4등분한다. 해당 최대조위편차 발생시점을 확인하여 고조를 기준으로 0~1/4시점에 해당하면 고조, 1/4~3/4시점이면 창조(또는 낙조), 3/4~4/4시점의 경우 저조 등으로 구분하였다.

20 cm를 초과하는 양의 조위편차의 전체 발생횟수는 인천에서 가장 빈번하였고 남해안으로 갈수록 적게 발생하여 부산

의 경우 인천에 비해 1/20 수준의 발생횟수를 보이고 있다. 조위별 발생분포의 경우 모든 해역에서 저조로 갈수록 빈도가 높게 나타나는 경향을 확인할 수 있다. 조시별 발생분포의 경우 역시 모든 해역에서 저조시 빈도가 높게 나타나고 있는데, 특히 완도를 중심으로 목포와 제주 등지에서 조위 및 조시 결과 공히 저조시 발생이 두드러지게 나타나고 있어 조석변조해일에 대한 경향성을 드러내고 있다. 그러나 창조시에 빈도가 증가하는 근거는 별로 없어 창조집중 경향성은 뚜렷하지 않은 실정이다.

### 3.2 비선형성 판정

비선형성을 정량적으로 판정하기 위하여 조위편차의 조위별 분포 및 조시별 분포 각각에 대한 균등분포 가설을 Chi-square test를 통해 검증(Haigh et al., 2010)하였다. 즉, 식 (2)와 같이 설정된  $\chi^2_c$ 에 대하여  $\chi^2_{1-\alpha, \nu}$  값과의 비교를 통해 더 클 경우 균등분포 가설이 기각되며 비선형성이 존재하는 것으로 인정된다.

$$\chi^2_c = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \tag{2}$$

여기서  $n$ 은 전체 도수,  $n_i$ 는 계급구간이  $i$ 에 속하는 자료의 수,  $p_i$ 는 계급구간  $i$ 에서 이론적인 확률을 나타낸다.  $\chi^2_c$  값은 유의수준  $\alpha\%$ 와 자유도  $\nu$ 에 의해  $\chi^2$ 검정을 위한 한계치  $\chi^2_{1-\alpha, \nu}$ 에 의해 적합도를 나타낸다.

목포항 자료 중 조위에 대한 검증절차를 예로 들면 2001년부터 2005년까지의 조위 예측치의 총 개수인 43,825개를 조위 발생횟수가 동일하도록 총 5개 구간으로 8,765개씩 포함되도록 나눈 결과 Table 1에 제시된 조위구간이 설정되었다. 각 조위구간에서 발생된 20 cm 이상의 양의 조위편차를 도수에 포함시킨 후 식 (2)로부터  $\chi^2_c$ 를 산정하였다. 조시의 경우 20 cm 이상의 조위편차에 대하여 최대조위편차 발생시점과 함께 고조 및 저조 발생시각을 내삽법을 이용해 찾아냄으로써 최대조위편차가 발생하는 조시를 판정한 후 역시 해당 조위편차의 도수를 산정하였다. 목포항의 경우에는 95% 유의수준에서 조위 및 조시 모두  $\chi^2_c$  값이 Table 2에 제시된 한계치보다 크므로 균등분포 가설이 기각되며 비선형성이 존재함을 보이고 있다.

이러한 절차를 통해 10개 모든 지점에서 조위 및 조시에 대해서 비선형 여부를 파악하여 Table 2에 제시하였다. 부산

**Table 1.** An example of chi-square test at Mokpo

	Frequency( $n_i$ )						$(n - np_i)^2$ $np_i$	
	2001	2002	2003	2004	2005	SUM		
Tide level	552~352	11	7	12	17	12	59	32.2
	351~288	13	11	11	12	12	59	32.2
	287~218	18	20	17	38	17	110	1.1
	217~138	26	31	24	32	33	146	4.9
	137~-78	52	43	44	48	47	234	103.9
SUM	120	112	108	147	121	608	174.3	
Tidal phase	Flood	14	8	13	17	11	63	52.1
	High	16	13	15	24	21	89	26.1
	Ebb	28	36	34	47	38	183	6.3
	Low	59	52	45	53	64	273	96.3
	SUM	117	109	107	141	134	608	180.8

**Table 2.** Results of chi-square test

Site	Tide level	Tidal phase
	$\chi^2_{4,0.95}$ (9.5)	$\chi^2_{3,0.95}$ (7.8)
Incheon	56.3	62.0
Anheung	11.8	10.1
Gunsan	33.9	21.6
Mokpo	174.3	180.8
Chuja	64.0	65.3
Jeju	34.4	34.3
Wando	111.8	114.2
Yeosu	30.2	20.9
Tongyoung	17.7	14.7
Busan	5.2	2.4

을 제외한 모든 지점에서 비선형성이 존재하는 것으로 나타나고 있으며 전반적으로 서해안에 비해 남해안에서 비선형성이 다소 우세한 것으로 나타나고 있다. 특히 목포와 완도 등 서남해안에서 비선형성이 가장 두드러지고 있다. 이러한 경향은 Table 1에 제시된 목포의 경우와 같이 5년간 연별차이가 크지 않아 전체 해역에서 5년간의 자료로부터 도출된 결론의 대표성을 뒷받침하고 있다.

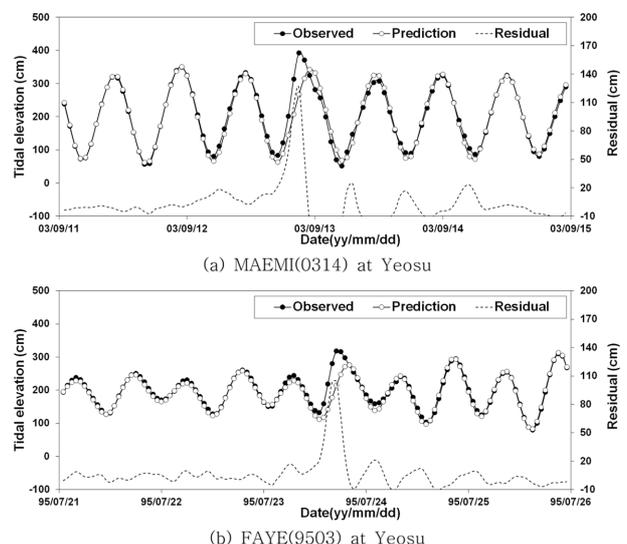
### 4. 한반도의 비선형성 특성

전술한 바와 같이 정량적으로 분석된 비선형성은 해역별로 구분되는 특성차를 보이고 있다. 이러한 비선형성의 원인과 2장에 제시된 위상오차와 조석변조해일과의 연관성을 파악하고자 하였다.

#### 4.1 위상오차

대표적인 조석-해일 비선형성으로 2장에 언급한 바와 같이 수심증가에 따라 파속 역시 증가하여 조석파가 예측치에 비해 일찍 도달함에 따라 위상오차가 발생하여 최대조위편차가 창조시에 주로 집중되는 현상이 있다. Rossiter(1961) 이후에 여러 연구자가 이에 대해 연구하였는데, 영국의 Dover(Haigh et al., 2010)와 역시 영국의 Workington(Olbert and Harnett, 2010) 등지에서 해일사상이 주로 창조시에 발생해 이 현상이 뚜렷하게 나타나고 있음을 밝힌 바 있다.

그러나 국내에서의 결과를 도시한 Fig. 2를 보면 대다수 해역에서 창조시 발생빈도가 두드러지게 나타나고 있지 않아 이러한 창조집중효과가 미미한 것으로 드러나고 있다. 창조집중 현상이 발생할 경우 Fig. 1에 보인 바와 같이 고조발생시각이 빨라지는 현상을 동반하게 된다. 그러나 국내 조위자료에서 해일로 인해 고조발생시각이 뚜렷하게 빨라지는 경우는 매우 드물게 나타나고 있으며 Fig. 3에 보인 태풍 MAEMI(0314) 및



**Fig. 3.** Examples of the interaction pattern which occurs at flood tide.

FAYE(9503) 내습시 여수에서와 같이 1 m 이상의 조위편차 발생시 정도에 국한하고 있다. 게다가 해당 사례도 태풍통과 시각이 창조시와 겹쳐 창조시 해일고가 크게 나타나는 경우와 구분되지 않으므로 순수하게 창조집중효과라는 근거는 부족한 상황이다. 이와 같이 국내환경에서는 유의미한 조석과의 파속변화를 보일 정도로 수심에 비해 해일고가 크게 발생하는 경우는 흔치 않아 창조집중형태로 나타나는 조석-해일 비선형효과는 희소한 것으로 파악된다.

4.2 조석변조해일

3장에서 분석한 바와 같이 조위편차가 저조시에 크게 나타나는 조석변조해일의 발생경향은 대부분 해역에서 관찰되고 있으며 목포와 완도 등 남서해안에서 특히 뚜렷하게 나타나고 있다. 목포와 완도에서 비태풍시 및 태풍시 각각 발생한 해일양상을 바람과 기압 및 조시와 관련된 정보가 포함된 Fig. 4에 제시하였다. Fig. 4(a)에 나타나듯이 비태풍시에는 미미한 기압강하량을 감안할 때 기압보다는 바람에 의한 수면상승이 지배적인 동시에 수일동안 지속되는 바람에 의해 저조시마다 해일고가 커지는 경향을 볼 수 있다. 반면 태풍시의 경우 Fig. 4(b)처럼 태풍경로에 가까워 태풍영향이 큰 경우에는 바람 뿐 아니라 기압에 의한 영향이 함께 작용하는 상태에서 태풍영향이 가장 심한 시점 부근의 저조시 조석변조해

일과 함께 최대조위편차를 나타내고 있다. 그러나 태풍영향이 단시간동안 급격히 발생할 경우 Fig. 3에서와 같이 최대조위편차가 저조시에 발생하지 않는 경우도 있다. 그러나 이 경우에도 최대조위편차가 발생하는 부근 저조시에 조석변조해일 경향이 약하게 나타나고 있다. 이와 같이 저조시 해일고가 잦은 현상은 정량적 분석에서 뿐 아니라 실제 사례에서도 수심이 얕은 서남해안을 중심으로 광범위하게 관찰되고 있다.

4.3 조석비대칭

전술한 바와 같이 국내 조석-해일 비선형성은 서남해안을 중심으로 두드러지게 나타나는 경향을 띠고 있다. 특히 Table 1에 제시된 바 있듯이 목포에서 가장 크게 나타나고 있는데, 목포의 경우 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 해일발생빈도가 저조시에 높은 것은 물론이고 창조에 비해 낙조시에도 유독 높게 나타나고 있다. 목포해역은 천해조가 발달되어 국내에서 가장 심한 낙조우세 형태의 조석비대칭 현상이 나타나고 있는 해역(Kang et al., 1998)이기에 낙조시 높은 해일발생빈도와 관련된 비선형성을 고찰하고자 한다.

목포해역에서 관찰되는 낙조우세의 전형적인 조위패턴을 Fig. 5에 제시하였는데 창조지속시간이 낙조지속시간에 비해 1시간 이상 길게 형성되고 있는 조석비대칭현상을 보여주고 있다. 조석이 해일에 미치는 영향이 전혀 없다면 낙조시보다 지속시간이 더 긴 창조시에 해일발생빈도가 높게 나타나야 할 것이다. 그러나 그림에 제시된 발생횟수에서 보듯이 오히려 낙조시 해일발생이 3배 정도 높은 빈도로 나타나고 있어 조석이 해일에 영향을 미치는 새로운 형태의 비선형성을 보이고 있다. 창조시와 낙조시 모두 양의 해일과 음의 해일 빈도가 비슷하게 나타나는 것으로 보아 조석과의 위상오차와는 무관한 것으로 판단된다. 이러한 현상과 관련된 전형적인 해일 발생패턴을 Fig. 6에 도시하였다. 2001년 12월 12일 전후에 발생한 계절풍으로 인하여 양의 조위편차가 지속된 이후 강한 북풍에 의한 음의 조위편차가 발생하고 있음을 볼 수 있

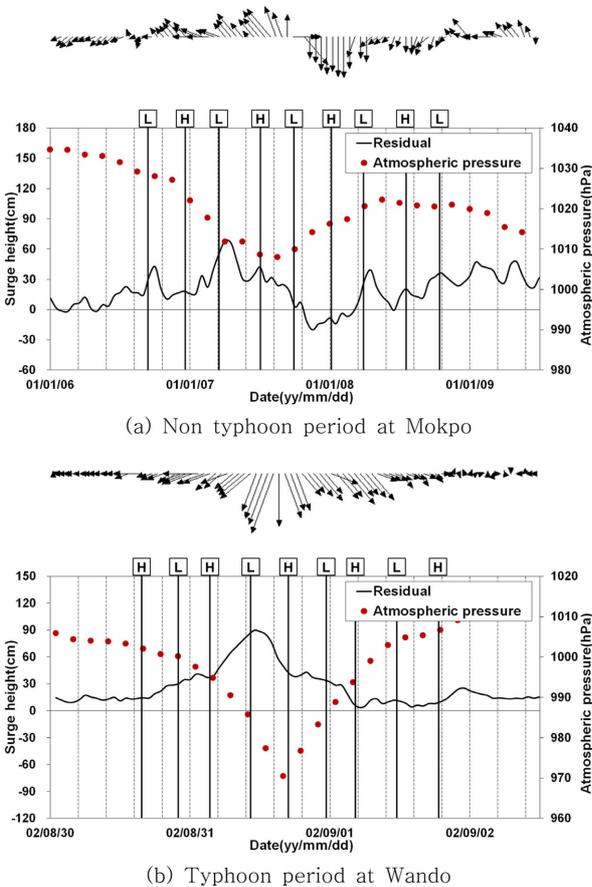


Fig. 4. Examples of the tide-modulated surges which occur at low tides.

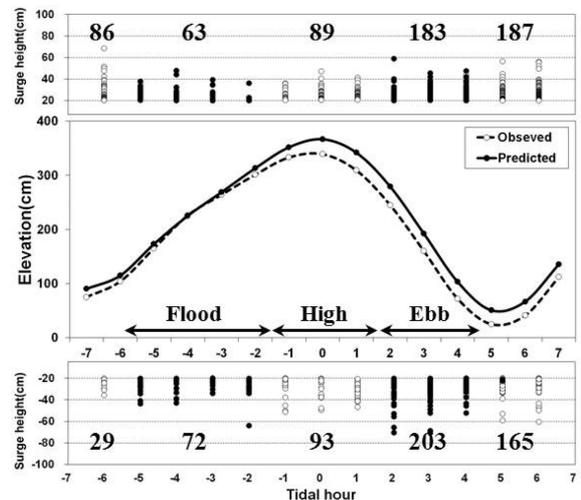


Fig. 5. A new interaction pattern which occurs at ebb tide

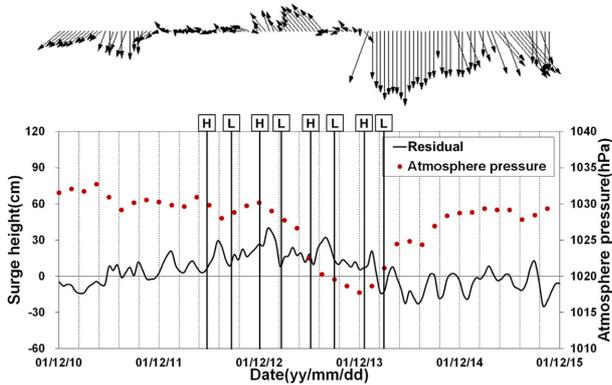


Fig. 6. An example of the new interaction pattern which occurs at ebb tide.

는데, 양의 조위편차 발생시기에 낙조시마다 조위편차가 커지고 있음을 볼 수 있다. 이러한 비선형패턴은 창조시 조위 변화에 비해 낙조시 조위변화가 더 급격한 상태에서 천문조에 비해 큰 천해조의 위상오차(Kang et al., 2013a)에 기인하는 것으로 추정된다.

#### 4.4 편기해일고

실무에서 폭풍해일 대책에 대한 설계조위 산정방법으로 ‘약 최고고조위에 빈도별 해일고를 더한 조위’(MOF, 2005)를 주로 채택하고 있다. 즉, 고조시 해일이 발생한 경우를 상정한 것으로 빈도별 해일고 산정시 발생조위를 감안하지 않으므로 조석-해일 비선형성의 배제를 전제하고 있다. 그러나 서남해안에서 관찰되는 바와 같이 조석-해일 비선형성이 강한 경우 최대조위편차가 주로 저조시(목포의 경우 낙조시도 포함)에 발생하게 되므로 해당 조위편차 자료로부터 산정된 빈도별 해일고는 고조시에 발생한 해일고와 동질하다고 볼 수 없을 것이다. 따라서 이러한 자료를 이용하여 고조시에 발생하는 범람해석과 같은 문제에 적용할 경우 해일고의 과다산정 오류가 우려된다. 또한 Fig. 1에 제시된 형태의 위상오차에 따른 조석잔차 역시 순수한 기상조 성분과는 구분되는데, 이 또한 빈도별 해일고 산정에 산입되는 것과 유사한 오류를 초래할 수 있다.

이러한 오류를 극복할 수 있는 방안으로 일반해일고 (instantaneous surge) 대신 Fig. 7과 같이 정의되는 편기해일고(skew surge)를 산정하는 방법이 있다. 이 방법은 특히 급격한 조위변화에 수반될 수 있는 위상오차와 같은 원치 않는 노이즈를 극복함과 동시에 실무적으로 중요한 고극조위 산정 등에 합당한 자료를 제공할 수 있는 장점이 있다(Weiss et al., 2012; Royston et al., 2013). 또한 일반해일고가 조석과의 상관성이 높은 것과는 달리 편기해일고는 조석과의 상관성이 적은 것으로 알려져 있으며(Howard et al., 2010), 목포항 자료를 도시한 결과인 Fig. 8을 보더라도 일반해일고는 저조쪽으로 치우쳐 있는 반면 편기해일고는 그렇지 않음을 볼 수 있다.

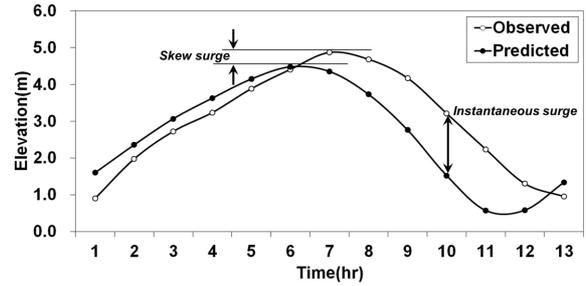


Fig. 7. Definition of the skew surge.

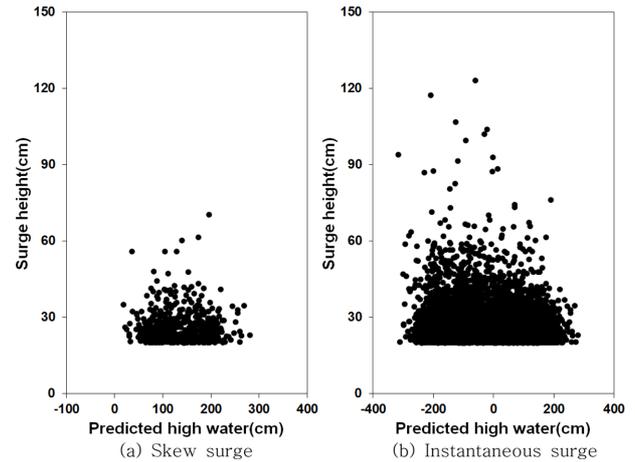


Fig. 8. Comparison of instantaneous surge and skew surge with respect to tidal height at Mokpo.

이와 같이 해일발생은 조위와 무관하지 않으므로 극치해면 산정시 해일만을 모의하여 조위면에 가산하는 방법은 상기한 바와 같은 오류를 내포하게 된다. 비선형성이 강한 목포 등지에서는 해일발생이 저조 또는 낙조에 주로 집중되므로 빈도별 해일고 산정에 있어 기존의 일반 해일고 대신 편기해일고를 산정함으로써 조석-해일 비선형 효과에 대한 영향성을 감소시킬 수 있을 것이다. 실례로 Kang et al.(2012)은 조석이 지배적인 해역에서 고조위에 편기해일고를 가산하는 방식으로 EST(empirical simulation technique)기법을 적용하여 극치해면고를 산정한 바 있다.

## 5. 결 론

조석과 해일은 상호 영향을 미치고 있어 해일이 조석에 미치는 영향으로 고조시각이 변화하는 현상을 들 수 있으며 조석이 해일에 미치는 영향으로는 창조집중과 조석변조해일 등이 있다. 국내에서의 이러한 조석-해일 비선형효과에 대한 발생실태를 정량적으로 분석한 결과 부산을 제외한 모든 해역에서 비선형성이 나타나고 있으며, 특히 목포를 중심으로 한 서남해안에서 두드러지게 나타나고 있다. 대규모 해일이 드물기 때문에 창조집중에 대한 사례는 흔치 않은 반면 저조시 조위편차가 커지는 조석변조해일 현상은 태풍시 뿐 아니라 비태풍시에도 자주 나타나고 있다. 또한 천해조가 발달하여 조석비대칭현상에 의한 낙조우세가 심한 목포해역의 경우 새로

운 형태의 조석-해일 비선형성에 의해 낙조시 해일고가 크게 나타나는 현상을 포착하였는데 이는 천해조의 위상오차와 연관이 있는 것으로 추정된다. 이러한 비선형성과 관련된 문제점을 해소하는 한 가지 방법으로 일반해일고 대신 편기해일고를 사용하는 방안에 대해서도 검토하였다.

## 감사의 글

이 논문은 2014년 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(종합해양과학기술기 구축 및 활용연구).

## References

- Bernier, N.B. and Thompson, K.R. (2007). Tide-surge interaction off the east coast of Canada and northeastern United States, *J. of Geophysical Research*, 112, 1-12.
- Brown, J., Souza, A. and Wolf, J. (2010). An 11-year validation of wave-surge modelling in the Irish Sea, using a nested POL-COMS-WAM modelling system, *Ocean Modelling*, 33, 118-128.
- Cho, H.Y., Ko, D.H. and Jeong, S.T. (2011). Missing pattern of the tidal elevation data in Korean coasts, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 23(6), 496-501. (in Korean)
- Flowerdew, J., Horsburgh, K., Wilson, C., Mylne, K. (2010). Development and evaluation of an ensemble forecasting system for coastal storm surges, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136, 1444-1456.
- Haigh, I., Nicholls, R. and Wells, N. (2010). Assessing changes in extreme sea levels: Application to the English Channel, 1900-2006. *Continental Shelf Research*, 30, 1042-1055.
- Horsburgh, K.J. and Wilson, C. (2007). Tide-surge interaction and its role in the distribution of surge residuals in the North Sea. *J. of Geophysical Research*, 112, 1-13.
- Howard, T., Lowe, J. and Horsburgh, K. (2010). Interpreting century-scale changes in Southern North Sea storm surge climate derived from coupled model simulations, *Journal of Climate*, 23, 6234-6247.
- Kang, J.W., Kim, Y.S. and Cho, H. (2013a). Decomposition of tidal residual data using a wavelet method and characteristic analysis of their short-period components, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 25(3), 165-171. (in Korean)
- Kang, J.W., Kim, Y.S. and Shim, J.-S. (2013b). Characteristic analysis of the tidal residuals' mid/long-period components using a wavelet method, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 25(4), 200-206. (in Korean)
- Kang, J.W., Kim, Y.S., Cho, H.Y. and Shim, J.-S. (2012). Estimation of extreme sea levels at tide-dominated coastal zone, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 24(6), 185-193. (in Korean)
- Kang, J.W., Song, J.J. and Oh, N.S. (1998). Analysis of ebb-dominant tidal currents characteristics at Mokpo Coastal Zone, *Journal of Korean Society of Civil Eng.*, 18(2), 458-465. (in Korean)
- McInnes, K. L., and Hubbert, G. D. (2003). A numerical modelling study of storm surges in Bass Strait, *Aust. Meteorol. Mag.*, 52, 143-156.
- Ministry of Oceans and Fisheries (2005). Design criteria for harbors. (in Korean)
- Olbert, A.I. and Harnett, M. (2010). Storms and surges in Irish coastal waters. *Ocean Modelling*, 34, 50-62.
- Park, S.J., Kang, J.W., Kim, Y.S. and Moon, S.R. (2010). Applicability of coupled tide-surge model, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 22(4), 248-257. (in Korean)
- Park, Y.H. and Suh, K.-D. (2012). Variations of storm surge caused by shallow water depths and extreme tidal ranges, *Ocean Engineering*, 44-51.
- Pugh, D. T. (1987). Tides, surges and mean sea-level: A Handbook For Engineers And Scientists, John Wiley, Hoboken, N. J., 199.
- Rossiter, J. R. (1961). Interaction between tide and surge in the Thames, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 6, 29-53.
- Royston, S.J., Horsburgh, K.J. and Lawry, J. (2013). Application of rule based methods to predicting storm surge. *Continental Shelf Research*, 37, 79-91.
- Seo, S.N. and Kim, S.I. (2014). Storm surges in West Coast of Korea by typhoon Bolaven(1215), *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 26(1), 41-48. (in Korean)
- Weiss, J., Bernardara, P., Andreewsky, M. and Benoit, M. (2012). Seasonal autoregressive modeling of a skew storm surge series. *Ocean Modelling*, 47, 41-54.

---

Received 6 November, 2014

Revised 2 December, 2014

Accepted 11 December, 2014