

조석-해일 특성을 반영한 극치해면고 산정 Estimation of Extreme Sea Levels Reflecting Tide-Surge Characteristics

강주환* · 김양선*
Ju Whan Kang* and Yang-Seon Kim*

요지 : 경험모의기법을 통해 국내 서남해안의 조석과 해일특성을 고찰하였다. 그 결과 인천, 군산, 목포, 완도 등은 조석지배해역이고 여수, 통영, 부산 등은 해일지배해역으로 구분되었다. 조석지배해역에서는 태풍해일이 발생하지 않아도 50년 이하의 빈도를 갖는 극치해면고가 형성될 수 있는 반면 해일지배해역에서는 10년 빈도에서만 태풍해일 없이 극치해면고가 형성될 수 있는 양상을 보이고 있다. 각 해역에서 빈도별로 평균적인 상황으로 어느 정도의 조위에 어느 정도의 해일이 겹쳐 극치해면고가 형성되는지 고찰한 결과 이 역시 해역별로 구분되는 특성을 보이고 있다. 이와 함께 설계조위 산정을 위한 세 가지 방법을 비교고찰한 결과 약최고고조위방법은 과다설계의 우려가 매우 큰 비현실적인 결과를 보이고 있으며, 확률분포함수방법은 대형태풍이 소조기나 저조시 발생할 경우 해당자료가 결과에 반영되지 않거나 매우 축소된 결과가 도출될 우려가 있다는 단점이 있다. 이러한 단점들을 해결함과 동시에 서해안과 같이 조석이 지배적인 해역에 적합한 방법으로 경험모의기법의 적용성을 확인하였다.

핵심용어 : 빈도해석, 극치해면고, 경험모의기법, 약최고고조위, 조석-해일

Abstract : Tide-surge characteristics of the West/South domestic coasts were analyzed with a tool of EST (empirical simulation technique). As a result, stations of Incheon, Gunsan, Mokpo and Busan are categorized as tide-dominant coasts, while Yeosu, Tongyoung and Busan are as surge-dominant coasts. In the tide-dominant coasts, extreme sea level of less than 50-yr frequency is formed without typhoon-surge, while only 10-yr extreme sea level is formed in the surge-dominant coasts. As the results of casual condition of extreme sea level formation considering the relative degree of surge on tide, the regional characteristics were detected also. Three methods for estimating the design tide level were compared. The AHHW method shows an unrealistic outcomes of the concern of over estimate design. Furthermore, the probability distribution function method has been concerned as causing missing data if a huge typhoon occurs in a neap tide or a low tide. To cope with these drawbacks, the applicability of the EST method is proved to be suitable especially in tide-dominant coasts.

Keywords : frequency analysis, extreme sea level, empirical simulation technique, AHHW, tide-surge

1. 서 론

국내에서 통용되는 폭풍해일 대책에 대한 설계조위 산정방법으로 해양수산부(MOF, 2014)에서 제시한 바는 1) 기왕고 극조위 또는 이것에 약간의 여유를 더한 조위, 2) 기왕 이상 조위의 발생확률곡선을 산정하고, 외삽법으로 구한 어떤 재현년도의 조위, 3) 해일 수치모형실험 등에 의해 해일고를 추산하는 경우는 약최고고조위(approximately highest high water; AHHW)에 해일고를 더한 조위, 4) 이상고조위의 발생확률과 각 조위에 대한 배후지의 피해액 및 해일 대책시설의 건설비를 감안하여 결정 등 4가지 항목을 제시하고 있다. 그런데 이 내용은 일본항만협회에서 제시한 내용(MLITT, 2009)과 거의 동일하며 일본에서 제시한 삭망평균고조면 대신 약최고고조위로 치환한 차이 정도만 있는 형편이다. 국내 조석

환경이 일본과 판이하며, 더욱이 동해, 서해, 남해별로 조석 특성차가 뚜렷하게 나타나고 있는 상황에 대한 고려 없이 일본의 설계기준을 그대로 차용하고 있는 실정이다. 그나마 조위관측자료가 풍부한 해역에서는 2)번 방법을 사용하면 해당 해역의 조석특성을 합당하게 반영할 수 있으나 관측자료가 제대로 축적되지 못한 곳에서는 주로 3)번 방법이 이용되고 있다. 2)번 방법으로 대표적인 방법은 Jeong et al.(2008)이 국내 조위관측소 자료를 사용하여 적용한 사례를 예시할 수 있는데 본 논문에서는 이를 ‘확률분포함수방법’이라 명명하고 3)번 방법을 ‘약최고고조위방법’이라 명명한다. 2)번 방법의 일종으로 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 적용하여 가상의 수백년 내지 수천년 자료를 모의발생시키는 방법인 경험모의기법(empirical simulation technique; EST)이 있다. 본 연구에서는 EST방법을 사용하여 국내 조석환경에 따른 극치해면고

*목포대학교 토목공학과(Corresponding author: Ju Whan Kang, Dept. of Civil Engineering, Mokpo National University, 1666 Yeongsan-ro, Cheonggye-myeon, Muan-gun, Jeonnam 58554, Korea, Tel: +82-61-450-2473, Fax: +82-61-452-6468, jwkang@mokpo.ac.kr)

산정의 지침을 제시하고자 하며, 더 나아가 확률분포함수방법과 약최고고조위방법의 한계점 역시 지적하고자 한다.

평균해수면으로부터 주요 4대분조의 진폭합(M2 + S2 + K1 + O1) 만큼 증가 또는 감소시킨 조위면은 각각 약최고고조위와 약최저저조위로 정의되며 대표적인 기준조위면으로 사용되고 있다. 특히 약최저저조위는 기본수준면으로 설정되어 바다에서 수준면의 영점으로 채택되어 대체불가의 지위를 차지하고 있다. 반면 약최고고조위는 대조(M2 + S2) 이상으로 드물게 발생하는 고조면의 개념을 내포하고 있으며 전술한 바와 같이 설계조위 산정과 관련된 대표조위로 활용되고 있는 실정이다. 상기 해양수산부(MOF, 2014)의 1)항과 3)항을 관련지어 해석하면 특정 해역에서의 기왕고극조위는 ‘매우 높은 조위상황’인 약최고고조위가 발생한 상황에 폭풍해일이 겹친 상황을 상정하고 있는 것으로 여겨진다. 이렇듯 설계조위 산정시 대표적인 조위면으로 사용되고 있는 약최고고조위는 주요 4대분조로 설정된다는 확정적인 개념에 근거하긴 하지만, 발생빈도가 명확한 대조평균고조위와 소조평균고조위, 또는 일본에서 주로 사용하고 있는 삭망평균고조위와는 달리 어느 정도의 빈도로 발생하는 것인지 불분명하다.

Kang et al.(2014a)은 약최고고조위의 발생확률을 산정하기 위하여 국내 8개 조위관측소의 1시간 간격 조위자료를 분석한 결과 인천을 비롯한 서해안에서 임의의 시각에서 약최고고조위를 초과하는 조위가 발생할 확률이 0.11~0.29%, 여수 등 남해안에서는 0.77~0.86%, 포항 등 동해안에서는 8.37~18.99% 등 지역별로 천차만별의 발생확률을 보이고 있음을 확인한 바 있다. 또한 태풍발생시기와 일치하는 여름철의 고조조위가 약최고고조위를 초과할 확률 역시 서해안에서 10% 미만으로서 약최고고조위가 ‘매우 높은 조위상황’이라 여겨질 수 있다. 그러나 남해안에서는 10~20% 정도의 초과확률을 보여 그 정도가 매우 완화되고 있으며 부산의 경우 40% 가까운 확률이며 동해안에서는 70% 이상의 확률을 보여 ‘매우 높은 조위’로 설정된 약최고고조위의 의미를 무색하게 하는 결과를 보이고 있다. 이와 같이 설계조위로 활용되고 있는 약최고고조위는 지역별로 발생확률 편차가 매우 클 뿐 아니라 부산을 포함한 동해안에서는 태풍이 발생하는 하절기에 ‘매우 높은 조위상황’으로 보기 어려운 실정이다. 이와 같이 빈도개념이 결여되어 있고 발생확률의 지역적 편차도 큰 약최고고조위를 사용하여 산정된 설계조위 역시 빈도개념과 발생확률의 지역적 편차 문제점을 벗어날 수 없을 것이다.

한편 조석이 우세한 서해안 및 남서해안에서 해일이 발생할 경우 최대해일고가 어느 시점에서 발생하느냐에 따라 조위와 해일고의 합으로 나타나는 총조위의 값도 크게 달라진다. 우리나라 서·남해안은 조차가 해일고의 크기보다 훨씬 우세한 ‘조석이 지배적인 해역’이므로 아무리 해일고가 크더라도 저조시에 발생하게 되면 대조기 고조위에 미치지 못하는 경우를 흔히 접할 수 있으며, 백중사리와 같은 대조기 고조시에는 작은 규모의 폭풍해일이 겹치더라도 저지대 침수현상이 발생하는 경

우도 종종 볼 수 있다. 앞서 언급한 바 있듯이 약최고고조위와 빈도별 해일고의 합으로 설계조위를 산정하는 방식은 고조가 발생하는 시점과 최대해일고가 발생하는 시점이 일치하는 것을 전제로 하고 있다. 그러나 서남해안에서 관찰되는 바와 같이 조석과 해일의 비선형성(Kang et al., 2014b)으로 인해 최대조위편차가 주로 저조시에 발생하게 되므로 고조시 발생을 전제로 하는 이러한 방식은 과대산정의 우려가 크다. 이러한 오류를 해결하기 위한 방안으로 일반해일고(instantaneous surge) 대신 편기해일고(skew surge)를 산정하는 방법이 있다. 이 방법은 특히 급격한 조위변화에 수반될 수 있는 위상오차와 같은 노이즈를 극복함과 동시에 실무적으로 중요한 고극조위 산정 등에 합당한 자료를 제공할 수 있다는 장점이 있다(Weiss et al., 2012; Royston et al., 2013).

따라서 약최고고조위를 사용함에 수반되는 발생확률의 문제와 최대해일고가 발생하는 시점에 관련된 문제 등으로 인해 기존방법으로 설정한 설계조위는 국내현실에 부적합한 측면이 있다. 또한 조석과 해일이 해면고에 미치는 상대적인 영향성이 해역별로 큰 차이가 있는 국내 조석특성을 감안하여 본 연구에서는 확률분포함수방법과 약최고고조위방법 등에 의한 설계조위 산정의 한계점을 규명하고자 한다. 궁극적으로 이러한 한계점을 극복하기 위한 방안으로 Kang et al.(2012)이 제안한 ‘조석이 지배적인 해역에 적용가능한 EST기법’을 적용한 극치해면고 산정방법을 제시하였다.

2. EST 방법 적용

2.1 EST 방법

극치해면고 산정방법으로 널리 사용되고 있는 확률분포함수방법은 관측기간이 최소 25년 이상인 곳에 적용이 가능한 방법(Pugh, 2004)이며 매년 한 개 정도의 연고극조위 자료만 사용하므로 자료의 낭비가 심할 뿐 아니라 큰 규모의 해일이 소조기나 저조시 발생할 경우 결과에 전혀 반영되지 않을 수 있어 소수의 이상치 자료에 매우 민감하다는 단점이 있다(Toro et al., 2010). 근래에는 이를 대체하는 방법으로 EST 방법(Scheffner et al., 1999)과 같이 과거사상을 비모수적 방법으로 해석하는 방법이 널리 사용되고 있다. 최근에는 조석이 우세한 해역에 적합한 기법도 개발된 바 있는데(Goring et al., 2011) 유사한 방법을 Kang et al.(2012)이 국내 목포항에 적용하여 성과를 얻은 바 있다.

2.2 입력자료 구축

본 연구에 적용한 EST 방법은 Kang et al.(2012)이 적용한 방법과 거의 동일한 방법인 바, 먼저 1년치의 고조위를 추출한 후 비태풍해일고와 태풍해일고를 가산함으로써 연중 최고해면고를 추출하게 된다. 고조위 자료는 해당 조위관측소의 한시간 관측자료로부터 조화분석을 통해 얻어진 분조로부터 20년치를 미리 발생시킨다. 이 중 임의로 일년치의 고조위

자료를 선택하게 되는데 여기에는 일조부등, 대소조, 계절조 뿐 아니라 달의 공전평면과 관련된 18.6년 주기까지 포함되도록 하였다. 비태풍 해일고 역시 Kang et al.(2011)의 연구결과를 준용하여 계절풍이 반영되도록 하였다. 태풍 해일고는 과거 해당 지역에 영향을 미쳤던 각종 태풍에 의한 해일고를 토대로 트레이닝세트를 작성하여 향후 발생하는 태풍의 모집단을 구성하게 된다. 트레이닝세트에는 태풍정보에 관한 입력벡터와 발생 해일고인 응답벡터로 구성되는데 일부 신뢰성이 미흡한 관측치에 대해서는 수치모형의 결과를 활용할 수 있다.

이러한 방식으로 고조위, 비태풍 해일고, 태풍 해일고를 1년 발생시킨 후 그 합으로부터 1년 동안의 최고조위인 연고극조위가 산정되며 Fig. 1에 목포항에 적용된 임의의 1년 자료를 모의발생시킨 결과(Kang et al., 2012)를 예시하였다. 해당연도에 태풍은 1회 발생하여 65 cm라는 작지 않은 해일고가 발생했음에도 불구하고 해당시점의 총조위는 487 cm에 불과하여 연고극조위는 고조위가 크게 발생한 여타 시점에 발생하고 있음을 볼 수 있다. 즉, 비태풍 해일고(단기성분 2 cm, 장기성분

13 cm) 15 cm, 고조위 503 cm가 발생한 시점에 연고극조위 518 cm가 기록되고 있다. 연고극조위 자료만을 해석대상으로 삼는 빈도해석방법의 경우 이렇게 연고극조위에 반영되지 않은 태풍해일사상은 극치해면고 산정에 전혀 영향이 미치지 않게 되는 경우도 있는 반면 EST 방법에서는 과거 기록된 태풍해일사상 전체를 토대로 하여 가상적인 수천년 이상의 자료를 모의발생시키는 방법이므로 이러한 단점을 극복할 수 있다.

이때 관측된 해일사상에 대한 자료기간이 짧은 경우 과거 자료의 한계성을 탈피하기 위해 가상태풍을 모의하여 그 결과를 트레이닝세트에 포함시켜 해석할 수도 있다(Divoky and Resio, 2007). 대다수 국내 조위관측소에서 관측된 태풍해일고 자료기간은 수십년에 불과한 실정이다. 관측기간을 초과하는 재현기간을 갖는 극치해면고를 산정하기 위해서는 향후 대형태풍이나 슈퍼태풍의 발생가능성을 염두에 두어야 하므로 관측된 수십년의 제한된 트레이닝세트 외에 추가적인 가상태풍이 포함되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 가상태풍을 트레이닝세트에 포함시키기 위하여 국토해양부(MLTMA,

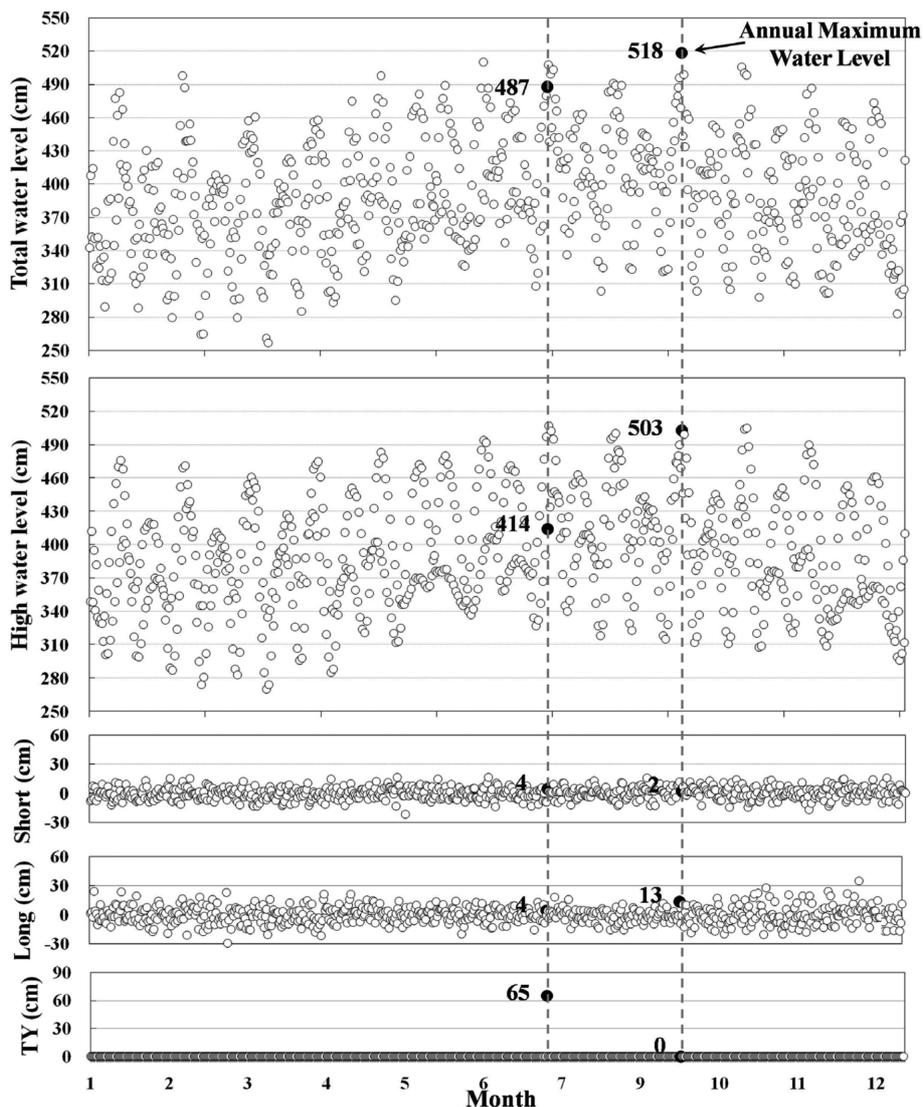


Fig. 1. Composition of the annual maximum water level (Kang et al., 2012).

Table 1. AHHW (cm) and surge height (cm) (MLTMA, 2010)

| St. | AHHW | Return period (yr) | | | | |
|-----|------|--------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | 10 | 30 | 50 | 100 | 200 |
| IC | 927 | 135 | 177 | 197 | 224 | 252 |
| GS | 743 | 123 | 163 | 182 | 207 | 233 |
| MP | 486 | 85 | 111 | 123 | 140 | 158 |
| WD | 400 | 90 | 112 | 122 | 135 | 148 |
| YS | 362 | 134 | 191 | 220 | 261 | 303 |
| TY | 282 | 105 | 150 | 173 | 205 | 238 |
| BS | 130 | 66 | 95 | 110 | 131 | 152 |

2010)에서 제시한 인천(IC), 군산(GS), 목포(MP), 완도(WD), 여수(YS), 통영(TY), 부산(BS) 등 7개 조위관측소 지점의 Table 1과 같은 빈도별 태풍해일고 산정결과를 차용하였다. 과거 수십년치의 관측된 태풍해일고 자료를 중복시켜 트레이닝세트를 200년 자료로 확장함과 동시에 차용된 100년 빈도 및 200년 빈도 해일고 자료를 하나씩 포함시킴으로써 미래 발생가능한 추가적인 기상태풍을 포함하는 200년 기간으로 확장된 트레이닝세트를 구성할 수 있다. 이와 함께 트레이닝세트의 제한성을 극복하기 위하여 미래 발생 가능한 태풍해일 사상은 기존의 트레이닝세트에 포함된 사상의 내삽 또는 외삽에 의해 새로운 사상이 발생되도록 ‘nearest neighbor random walk’ 기법을 도입하였으며, 1장에 언급한 바와 같이 산정된 태풍해일고에 대한 편기해일고(skew surge)를 산정함으로써 조석과 고조위의 시차를 반영한 것은 Kang et al.(2012)에 도입한 것과 동일한 기법들이다.

앞에서 살펴본 바와 같이 임의의 1년치 모의발생된 해면고

중 연고극조위는 태풍발생시기일 경우도 있고 아닐 경우도 있다. 즉, 조석이 지배적인 해역에서는 조위가 낮은 시기에 태풍해일이 발생할 경우 연고극조위와 무관할 수 있다. EST 방법의 반복모의를 통해 수백년 내지 수천년 이상의 자료를 모의할 수 있고 이를 통해 Hawkes et al.(2002)이 제안한 ‘count back’ 방식으로 재현기간을 산정할 수 있다. 즉, 연최고해면고를 n개 발생시켰을 때 이를 큰 값 순서로 나열한 후 p번째 순위에 있는 조위의 재현기간은 n/p로 산정할 수 있다. 즉, 1,000번 시뮬레이션 후 상위 10번째 순위의 해면고가 100년 빈도가 되고 20번째 순위는 50년 빈도가 되는 식이다. 이러한 모의를 독립적으로 여러 번 반복하면 매번 약간씩 달라지는 극치해면고를 얻을 수 있으며, 극치해면고를 구성하고 있는 성분 역시 매번 다른 값으로 형성된다.

3. EST를 활용한 해역별 조석특성 분석

3.1 적용사례

앞서 제시한 EST 방법으로 가상적인 1,000년간 시뮬레이션을 시행한 후 상위 5번째, 10번째, 20번째, 33번째, 100번째 순위를 각각 200년 빈도, 100년 빈도, 50년 빈도, 30년 빈도, 10년 빈도의 극치해면고로 산정하였다. 이러한 시뮬레이션을 20회 반복한 후 그 평균치를 최종적인 해당 빈도값으로 산정하였는데, 7개 지점의 중간에 위치한 완도에서의 빈도별 20회 시뮬레이션을 시행한 결과 중 일부를 극치해면고(extreme sea level; ESL)와 이를 구성하는 각 성분인 고조위(high water; HW), 태풍해일고(typhoon surge; TS), 비태풍

Table 2. Example of extreme sea level (at Wando station) (unit: cm)

| No | Return period 10 yr | | | | Return period 30 yr | | | | Return period 50 yr | | | |
|------|---------------------|-----|-----|-----|---------------------|-----|-----|-----|---------------------|-----|-----|-----|
| | ESL | HW | TS | NS | ESL | HW | TS | NS | ESL | HW | TS | NS |
| 1 | 449 | 427 | 0 | 22 | 454 | 427 | 0 | 27 | 458 | 436 | 0 | 22 |
| 2 | 449 | 431 | 0 | 18 | 455 | 432 | 0 | 23 | 458 | 436 | 0 | 22 |
| 3 | 449 | 429 | 0 | 20 | 456 | 436 | 0 | 20 | 460 | 436 | 0 | 24 |
| 4 | 448 | 425 | 0 | 23 | 454 | 422 | 26 | 6 | 457 | 359 | 106 | -8 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 18 | 449 | 404 | 42 | 3 | 455 | 433 | 8 | 13 | 458 | 423 | 34 | 1 |
| 19 | 449 | 422 | 0 | 27 | 454 | 433 | 0 | 21 | 458 | 427 | 0 | 31 |
| 20 | 449 | 417 | 0 | 32 | 455 | 431 | 33 | -10 | 459 | 433 | 0 | 26 |
| Mean | 449 | 426 | 4 | 19 | 455 | 428 | 6 | 21 | 459 | 425 | 15 | 19 |

| No | Return period 100 yr | | | | Return period 200 yr | | | |
|------|----------------------|-----|-----|-----|----------------------|-----|-----|-----|
| | ESL | HW | TS | NS | ESL | HW | TS | NS |
| 1 | 463 | 381 | 78 | 4 | 493 | 408 | 84 | 1 |
| 2 | 468 | 416 | 58 | -6 | 485 | 387 | 92 | 6 |
| 3 | 477 | 414 | 59 | 4 | 517 | 349 | 168 | 0 |
| 4 | 467 | 416 | 48 | 3 | 478 | 411 | 58 | 9 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 18 | 466 | 426 | 0 | 40 | 476 | 400 | 67 | 9 |
| 19 | 468 | 416 | 49 | 3 | 486 | 432 | 34 | 20 |
| 20 | 467 | 425 | 34 | 8 | 485 | 304 | 184 | -3 |
| Mean | 469 | 414 | 48 | 7 | 488 | 385 | 103 | 0 |

해일고(non-typhoon surge; NS) 등으로 구분하여 Table 2에 예시하였다.

10년, 30년, 50년, 100년, 200년 각 빈도의 20회 평균한 극치해면고(ESL)는 각각 449 cm, 455 cm, 459 cm, 469 cm, 488 cm로 산정되었으며, 성분별 평균값은 고조위(HW)가 각각 426 cm, 428 cm, 425 cm, 414 cm, 385 cm이고 태풍해일고(TS)는 각각 4 cm, 6 cm, 15 cm, 48 cm, 103 cm, 평균적인 비태풍해일고(NS)는 각각 19 cm, 21 cm, 19 cm, 7 cm, 0 cm로 나타나고 있다. 또한 50년 빈도에서는 20회 반복시행(표에는 7회만 제시됨)에서 106 cm의 태풍해일을 포함하여 총 5번(표에는 2번만 제시됨)의 태풍해일고가 포함되었을 뿐 나머지 15회에서는 순수하게 고조위 및 비태풍해일고만으로 극치해면고가 형성되고 있음을 볼 수 있다. 30년 이하 빈도에서는 2~3번만 태풍해일고가 포함된 반면 100년 빈도의 경우 반대로 20회 중 18회에서 태풍해일고가 포함되어 극치해면고가 형성되고 있으며 고조위 및 비태풍해일고만으로 극치

면고가 형성되고 있는 경우는 2회에 불과하다. 200년 빈도에서는 고조위 및 비태풍해일고만으로 극치해면고가 형성되는 경우는 전무하고 20회 전체가 34 cm~184 cm의 태풍해일고를 포함하고 있다.

즉, 완도에서 극치해면고가 형성되는 대표적인 상황은, 50년 이하 빈도의 경우 태풍해일이 발생하지 않아도 고조위 비태풍 해일고만으로도 가능함을 확인할 수 있다. 태풍해일 없이 10년, 30년, 50년 빈도 극치해면고가 발생하는 18번, 17번, 15번 경우의 고조위 평균값은 각각 427 cm, 430 cm, 433 cm 정도로 완도항의 약최고고조위인 400 cm에 비해 27~33 cm나 높은 상태에서 비태풍해일고가 겹쳐 극치해면고가 형성되고 있다. 그러나 100년 빈도 이상의 경우 고조위와 비태풍 해일고만으로 극치해면고가 형성되는 경우는 2회 뿐으로 거의 발생하지 않고 있으며 재현기간이 길어질수록 태풍해일고가 커짐에 따라 고조위 평균값은 작게 형성되고 있음을 볼 수 있다.

Table 3. Mean (upper) and standard deviation (lower) of extreme sea level and its components (unit: cm)

| St. | Return period 10 yr | | | | Return period 30 yr | | | | Return period 50 yr | | | |
|-----|---------------------|------|------|------|---------------------|------|------|------|---------------------|------|------|------|
| | ESL | HW | TS | NS | ESL | HW | TS | NS | ESL | HW | TS | NS |
| IC | 974 | 960 | 2 | 14 | 981 | 957 | 8 | 16 | 984 | 955 | 11 | 18 |
| | 0.5 | 7.9 | 8.3 | 10.0 | 0.9 | 17.6 | 25.1 | 10.7 | 2.5 | 21.5 | 25.2 | 6.4 |
| GS | 769 | 746 | 9 | 14 | 775 | 752 | 2 | 21 | 779 | 751 | 7 | 21 |
| | 0.5 | 23.4 | 29.3 | 12.8 | 0.9 | 9.1 | 9.4 | 12.4 | 1.9 | 12.4 | 18.0 | 6.9 |
| MP | 540 | 518 | 1 | 21 | 546 | 526 | 0 | 20 | 549 | 516 | 16 | 17 |
| | 0.5 | 4.7 | 6.1 | 12.5 | 0.8 | 5.2 | 0.0 | 11.1 | 1.5 | 19.0 | 24.1 | 11.3 |
| WD | 449 | 426 | 4 | 19 | 455 | 428 | 6 | 21 | 459 | 425 | 15 | 19 |
| | 0.5 | 6.8 | 12.9 | 13.5 | 0.9 | 8.9 | 15.1 | 14.8 | 1.4 | 18.1 | 29.4 | 13.3 |
| YS | 405 | 380 | 7 | 18 | 429 | 331 | 95 | 3 | 454 | 323 | 131 | 0 |
| | 0.8 | 12.1 | 16.8 | 13.1 | 6.7 | 39.2 | 47.7 | 15.4 | 9.7 | 44.9 | 48.4 | 8.6 |
| TY | 334 | 305 | 13 | 16 | 355 | 276 | 74 | 5 | 375 | 262 | 111 | 2 |
| | 0.9 | 19.7 | 23.6 | 11.8 | 7.2 | 32.5 | 39.2 | 15.3 | 10.1 | 30.0 | 34.1 | 8.3 |
| BS | 177 | 146 | 9 | 22 | 189 | 141 | 41 | 7 | 199 | 135 | 61 | 3 |
| | 0.7 | 11.5 | 16.3 | 11.9 | 4.0 | 10.4 | 20.1 | 14.7 | 5.7 | 15.3 | 22.2 | 9.9 |

| St. | Return period 100 yr | | | | Return period 200 yr | | | |
|-----|----------------------|------|------|------|----------------------|------|------|------|
| | ESL | HW | TS | NS | ESL | HW | TS | NS |
| IC | 1001 | 902 | 91 | 8 | 1043 | 880 | 159 | 4 |
| | 13.2 | 60.8 | 69.0 | 9.9 | 29.2 | 57.4 | 70.1 | 10.6 |
| GS | 795 | 680 | 110 | 5 | 843 | 693 | 146 | 4 |
| | 9.9 | 67.3 | 72.6 | 10.6 | 31.6 | 40.3 | 50.0 | 8.6 |
| MP | 557 | 508 | 29 | 20 | 572 | 478 | 95 | 1 |
| | 4.2 | 23.8 | 35.9 | 14.3 | 13.9 | 41.3 | 47.1 | 8.9 |
| WD | 469 | 414 | 48 | 7 | 488 | 385 | 103 | 0 |
| | 5.5 | 18.2 | 24.3 | 13.7 | 11.3 | 38.6 | 44.3 | 6.9 |
| YS | 498 | 326 | 168 | 4 | 545 | 322 | 223 | 0 |
| | 19.9 | 30.2 | 34.0 | 9.0 | 29.4 | 35.7 | 43.4 | 9.0 |
| TY | 409 | 267 | 143 | -1 | 443 | 268 | 176 | -1 |
| | 15.4 | 22.2 | 21.9 | 6.6 | 18.7 | 23.5 | 32.7 | 10.2 |
| BS | 219 | 130 | 89 | 0 | 242 | 133 | 110 | -1 |
| | 8.5 | 10.6 | 13.1 | 8.8 | 13.9 | 12.5 | 20.6 | 8.1 |

3.2 해역별 특성

전절에 기술한 동일한 방식으로 완도를 포함한 7개 지역에서 20회 산정한 빈도별 극치해면고 및 극치해면고를 형성하는 고조위 성분, 태풍해일 성분, 비태풍해일 성분 등에 대한 평균치와 표준편차를 Table 3에 제시하였다. EST 방법이 갖고 있는 장점 중의 하나가 극치해면고 산정을 위해 여러 번의 시뮬레이션을 통해 평균치와 표준편차를 구할 수 있어 산정된 수치의 신뢰수준별 값의 범위를 설정할 수 있다는 점(Kang et al., 2017)이다. 즉, 조차가 큰 서해안에서 재현기간이 짧을수록 극치해면고의 표준편차가 매우 작게 형성되고 있음을 확인할 수 있는데, 재현기간이 짧을수록 극치해면고에서 (변동성이 작은) 조석이 기여하는 비중이 크기 때문인 것으로 이해된다. 반면 재현기간이 길어질수록 (변동성이 큰) 태풍해일의 영향이 커지므로 표준편차가 커짐을 볼 수 있다.

Table 3에 제시된 극치해면고의 성분별 분석에 앞서 태풍해일사상을 동반하지 않은 상태에서 조위만으로 극치해면고가 발생하는 상황을 먼저 고찰하였다. 이를 위해 앞서 소개한 완도에서와 같이 각 빈도별로 20회 중 태풍해일이 극치해면고 형성에 영향을 준 회수를 Table 4에 제시하였다. 인천, 군산, 목포 및 완도 등에서는 다수의 50년 이하 빈도는 물론이고 일부의 100년 빈도까지 태풍 발생 없이 고조위 비태풍해일고 발생만으로도 극치해면고가 형성될 수 있음을 보이고 있다. 즉, 극치해면고가 태풍 내습시에만 형성되는 것이 아니라 서해안에서는 재현기간 50년 이하의 경우 오히려 비태풍시 백중사리와 같은 시기에 극치해면고가 형성되는 상황이 더욱 일반적이라 할 수 있다. 반면, 서해안의 재현기간 200년 이상인 경우와 여수, 통영, 부산 등 남해안의 재현기간 30년 이상인 경우에는 태풍발생 없이 고조위와 비태풍만으로 극치해면고가 발생하는 상황은 거의 없음을 볼 수 있다.

이와 같이 인천, 군산, 목포 등 서해안 전체와 남서해안에 위치한 완도에서는 극치해면고 산정에 있어 조석의 비중이 상대적으로 우세한 조석지배해역이라 할 수 있는 반면 여수, 통영, 부산 등 남동해안에서는 태풍해일의 비중이 상대적으로 우세한 해일지배해역이라 할 수 있다. 이와 같이 국내연안의 극치해면고 산정시 조석지배해역과 해일지배해역에 대한 구분이 필요하며, 조석지배해역에서는 태풍해일 뿐 아니라 조석에 대한 세심한 해석이 병행되어야 한다. 이러한 배경하에

Table 4. Times of occurring extreme sea level without typhoon

| St. | Return period (yr) | | | | |
|-----|--------------------|-------|-------|------|------|
| | 10 | 30 | 50 | 100 | 200 |
| IC | 19/20 | 17/20 | 15/20 | 3/20 | 1/20 |
| GS | 18/20 | 19/20 | 17/20 | 1/20 | 0/20 |
| MP | 19/20 | 20/20 | 13/20 | 9/20 | 0/20 |
| WD | 18/20 | 16/20 | 15/20 | 2/20 | 0/20 |
| YS | 17/20 | 2/20 | 0/20 | 0/20 | 0/20 |
| TY | 15/20 | 1/20 | 0/20 | 0/20 | 0/20 |
| BS | 15/20 | 2/20 | 0/20 | 0/20 | 0/20 |

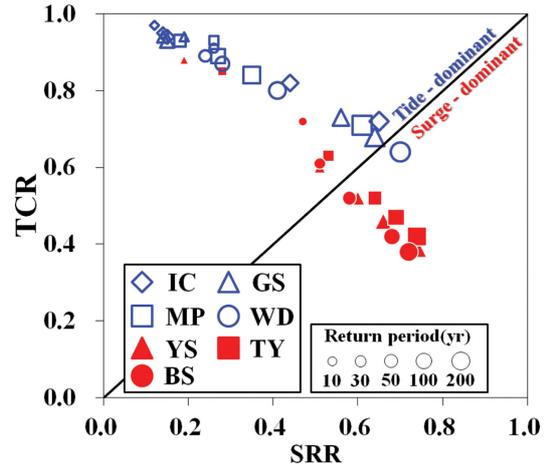


Fig. 2. Tide contribution ratio (%) and surge reproduction ratio (%).

조석지배해역과 해일지배해역에 대한 정량적 지표를 다음과 같이 도출하여 분석에 활용하였다.

Table 3에 제시된 극치해면고(ESL)는 기본수준면을 기준으로 산정된 것인데 이를 평균해면 기준으로 환산하려면 약최고고조위의 절반만큼 빼주면 된다. 평균해면보다 높은 고조위라는 사전적 의미를 유지하기 위하여 평균해면 기준으로 환산하였는데, 이런 식으로 환산한 극치해면고(ESL) 중 고조위 성분(HW)이 차지하는 비율을 조석기여율(tide contribution ratio; TCR)이라 정의하였다. 예를 들면 인천에서 10년 빈도의 평균해면 기준의 ESL은 $974-927/2=510.5$ 이고 HW는 $960-927/2=496.5$ 이므로 TCR은 $496.5/510.5=0.97$ 로 산정된다. 또한 해일성분(TS & NS)의 Table 1의 재현기간별 해일고에 대한 비율을 해일재현율(surge reproduction ratio; SRR)이라 명명하였는데, 인천에서 10년 빈도 예를 다시 들면 $SRR=(2+16)/135=0.13$ 이 된다. 이렇게 산정된 두 가지 지표를 Fig. 2에 제시하였다. TCR과 SRR은 서로 반비례하는 경향을 보이고 있으며 재현기간이 길어질수록 TCR은 감소하고 SRR은 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 $TCR > SRR$ 인 영역은 조석지배해역, $TCR < SRR$ 인 영역은 해일지배해역과 대체적으로 일치하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 2에서 보듯이 앞서 구분지는 조석지배해역(IC/GS/MP/WD)에서는 30년 이하 빈도의 경우 조석기여율(TCR)이 0.9를 상회하고 있으며 50년 빈도 이상의 경우에도 0.6 이상을 보이고 있어 평균해수면을 기준으로 극치해면고 발생시 조석에 의한 기여도가 해일에 의한 기여도를 크게 초과하는 것으로 나타나고 있다. 또한 해일재현율(SRR)은 50년 이하 빈도에서는 0.3에도 미달하고 있으며 200년 빈도인 경우에 0.6을 초과하고 있다. 즉, 50년 이하의 경우 극치해면고 중 조석이 차지하는 비율이 매우 높을 뿐 아니라 해일이 발생하더라도 극치해면고에 반영되는 비율은 30%에도 미달하는 정도이며, 100년 빈도 이상인 경우에도 조석이 차지하는 비율은 높은 수준을 유지하고 있는 상태에서 해일이 극치해면고에 반영되는 비율은 60%를 초과하고 있어 그림에서 보듯이 대부분 ‘Tide-

dominant' 영역에 위치하고 있다. 따라서 이 지역에서는 기존의 확률분포함수방법이나 약최고고조위방법보다 조석이 실제적으로 반영되는 EST 방법이 훨씬 효율적이라 평가된다. 해일지배해역(YS/TY/BS)의 경우 10년 빈도에서만 0.7~0.9 정도의 조석기여율과 0.5를 밑도는 해일재현율을 보여 조석 지배의 특성을 보이고 있지만 나머지 빈도에서는 0.3~0.6 정

도의 조석기여율과 0.5~0.8 정도의 해일재현율을 보이고 있다. 즉, 평균해면을 기준으로 할 때 극치해면고 중 조석이 차지하는 비중에 비해 해일이 차지하는 비중이 약간 더 큰 것으로 나타나고 있으며 발생한 해일이 극치해면고에 반영되는 비율은 50%를 상회하는 정도를 보이고 있어 그림에서 보듯이 50년 빈도 이상에서는 'Surge-dominant' 영역에 분포되어

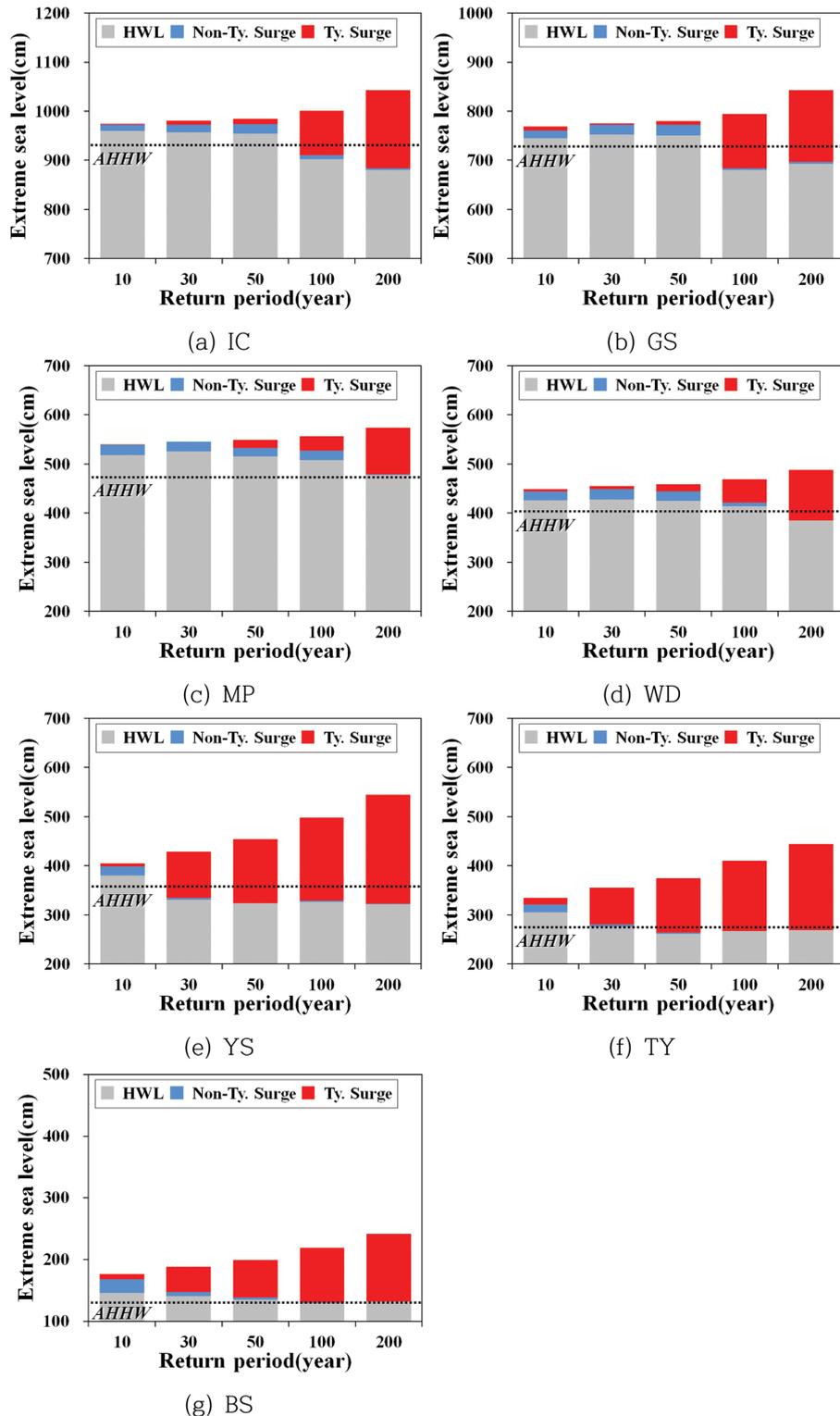


Fig. 3. Usual case of occurring extreme sea level and its components.

있다. 이러한 해역 역시 조석상황이 포함되는 EST 방법의 적용이 요구되는 동시에 태풍해일 역시 매우 중요한 요소로서 빈도별 해일고 산정을 위한 정밀한 태풍-해일 해석이 병행되어야 한다.

3.3 극치해면고 구성성분

전절에 보인 바와 같이 극치해면고의 구성성분은 재현기간이 짧을수록 조석의 영향이 커지는 반면 재현기간이 길어질수록 해일의 영향이 커지는 경향이 있다. 각 빈도별 극치해면고 산정을 위해 1,000년간 시뮬레이션을 20번 반복하여 평균값으로 극치해면고를 산정한 것은 주지한 바와 같다. 이때 20번의 극치해면고 및 그 구성성분은 매년 약간씩 달라지게 되는데 그 평균값을 대표적인 상황으로 간주하여 해당빈도에서 극치해면고 구성성분을 분석하였다.

이를 위해 EST 방법이 적용된 결과인 Table 3을 토대로 작성된 각 조위관측소의 빈도별 극치해면고를 조석 및 해일(태풍 + 비태풍)의 두 가지 성분으로 구분하여 약최고고조위(AHHW)와 함께 Fig. 3에 제시하였다. 이를 통해 각 지역에서 극치해면고가 형성되는 평균적인 상황은 다음과 같이 정리된다. 완도를 포함하여 서해안에 위치한 조석지배해역에서 50년 빈도 이하의 경우 약최고고조위를 크게 초과하는 조위 조건에 20 cm 미만의 작은 해일고가 겹쳐 극치해면고가 형성되고 있으며 100년 빈도 역시 약최고고조위 수준의 조위 조건에 10년 빈도에도 미달(Table 1의 빈도별 해일고와 비교한 결과)하는 태풍해일고가 겹쳐진 상황을 보이고 있다. 즉, 대형태풍의 내습 없이도 극치해면고가 형성되고 있는 전형적인 조석지배해역의 특징을 나타내고 있다. 단, 200년 빈도의 경우에는 약최고고조위에 미달하는 조위 조건에 10~30년 빈도 정도의 태풍해일이 겹쳐 극치해면고가 형성되고 있어 조석 뿐 아니라 해일의 비중도 커지는 경향을 보이고 있다. 반면, 여수, 통영, 부산 등 해일지배해역에서는 10년 빈도의 경우만 약최고고조위를 크게 초과하는 조위 조건에 태풍의 영향은 미미한 상태에서 비태풍해일고가 크게 작용하여 극치해면고가 형성되고 있다. 30년 빈도 이상의 경우 빈도별로 조위 조건은 큰 변화 없이 약최고고조위보다 작거나(여수) 비슷한 수준(통영, 부산)에서 Table 1의 10년, 30년, 50년 빈도 정도의 태풍해일이 겹쳐 50년, 100년, 200년 빈도의 극치해면고가 각각 형성되고 있음을 보이고 있다. 즉, 이러한 해일지배해역의 특성을 보이는 곳에서는 10년 빈도의 경우 조석지배해역과 동일한 방식이 요구되지만 30년 빈도 이상인 경우 이를테면 약최고고조위방법과 같이 적절한 처리한 조위 조건 상태에서 태풍해일에 대한 심도 있는 정밀한 계산이 요구된다.

4. 설계조위 산정법 비교

4.1 기존방법 정성적 평가

서론에 언급한 바와 같이 현재 우리나라 실무에 가장 널리

적용되고 있는 설계조위 산정법은 빈도별 폭풍해일고를 약최고고조위의 조위 조건에 가산하는 방법인 약최고고조위방법이다. 약최고고조위 자체가 빈도개념이 없으며 해역별로 발생 빈도의 큰 차이가 내재되어 있는 동시에 특히 서해안의 경우 약최고고조위 발생이 혼한 일이 아님(Kang et al., 2014a)을 감안할 때 약최고고조위와 빈도별 폭풍해일의 조위확률은 매우 작을 수밖에 없다. 따라서 이렇게 산정된 설계조위 역시 해역별로 초과확률이 천차만별로 차이가 있으며, 더욱이 서해안에서는 과대산정의 우려가 매우 크게 된다. 이 방법은 실무적으로 설계조위 산정 뿐 아니라 침수예상도 작성에도 적용되고 있는 바, 약최고고조위의 조위 조건과 함께 수치모의를 통해 산정된 해일 시계열을 사용하여 침수예상도를 작성하기에 동일한 이유로 매우 과장된 침수역이 산정될 우려가 있다.

한편 장기기간의 관측된 조위자료가 축적된 지역에서는 관측 자료를 사용하여 확률분포함수방법으로 빈도별 해면고를 산정하는 방법이 과거에 널리 사용되어 왔다. 이 방법은 장기기간의 조위관측자료로부터 확률분포함수를 활용한 외삽에 의해 빈도별 극치해면고를 산정하는 방법으로서 관측자료에 근거하므로 가장 신뢰도가 높게 평가되는 방법이다. 그러나 이 방법 역시 최소 25년의 관측자료가 필요하고 관측자료의 4배 이내 기간에서 외삽이 가능(Pugh, 2004)할 뿐 아니라 과거 자료만 사용하므로 미래기후변화를 반영하지 못한다는 한계가 있다. 게다가 대형태풍에 의한 해일의 침투치가 소조기나 저조시에 발생할 경우 해당연도의 고조조위와는 무관한 자료로 극치해면고 산정에 반영되지 않을 가능성이 있게 된다. 최근 Bacopoulos(2017)는 이 방법을 이용하여 미국 동부해안에서 극치해면고를 산정한 바 있는데, 산정된 결과에 영향을 미치는 16개 태풍해일을 분석한 바 있다. 1999년에 발생한 Floyd 태풍에 의한 해일고는 매우 컸지만 저조시에 발생하여 16개 사상에 포함되지도 않았었고 2016년 발생한 기왕최대 규모의 태풍인 Matthew의 경우 높은 조위상황이 아닌데도 불구하고 기왕최고고조위를 기록할 수 있었다. 만일 이 태풍이 고조시에 발생했다면 1,000년 빈도의 극치해면고가 발생할 수 있었다는 연구결과와 함께 Matthew 태풍이 발생하기 전인 2015년까지의 자료로부터 해석한 결과와 비교할 경우 해당태풍을 분석에 포함시키는 경우에 비해 포함시키지 않을 경우 극치해면고가 13~14% 정도 감소하고 있는 결과도 함께 제시하고 있다. 이러한 연구결과를 통해 Bacopoulos (2017)는 EST 방법이나 JPM(joint probability method) 방법의 필요성을 개진한 바 있다. 이와 같이 본 연구에서 제시한 EST 방법은 관측자료가 축적되어 있지 않은 곳에서도 기본적인 조화상수와 빈도별 해일고만 갖춰져 있을 경우 상기 방법들의 문제점이 모두 해결될 수 있는 방법이다. EST, 확률분포함수방법, 그리고 약최고고조위방법 등 세 가지 방법을 각각 적용한 결과 및 비교고찰한 내용을 다음 절에 제시하였다.

4.2 빈도해석결과 비교

3장에 기술한 바와 같이 EST 방법에 의해 7개 지역에서 20회 산정한 평균치로 각 빈도별 극치해면고를 산정할 수 있는데, 평균값과 더불어 표준편차까지 산출할 수 있어 신뢰수준별 값의 범위까지 제시할 수 있다. 즉, 95% 신뢰구간은 평균값(μ)에서 2배의 표준편차(σ)를 가감한 범위인 바, 95% 신뢰구간의 최대값 또는 최소값이 되도록 평균에 2배의 표준편차를 가감한 결과를 제시함으로써 탄력적인 결과제시 및 해석이 가능해진다. 이렇게 평균값으로 산정한 극치해면고와 95% 신뢰구간 범위의 극치해면고를 확률분포합수방법(Jeong

et al., 2008) 및 약최고고조위방법(AHHW method)으로 산정한 결과와 함께 Fig. 4에 제시하였다. 약최고고조위방법에서 빈도별 해일고는 국토해양부의 수치실험결과(MLTMA, 2010)인 Table 1에 제시된 수치를 준용하였다.

전반적으로 약최고고조위방법이 모든 경우에서 극치해면고를 매우 크게 산정하고 있는데 이는 전술한 바와 같이 약최고고조위와 태풍해일이 동시에 발생할 결합확률을 현실적으로 반영하지 못한 결과에 연유하는 것으로 판단된다. 반면 인천을 비롯한 조석지배해역 4곳에서는 확률분포합수방법의 결과가 EST 방법과의 차이가 크지 않으며 특히 재현기간이 길

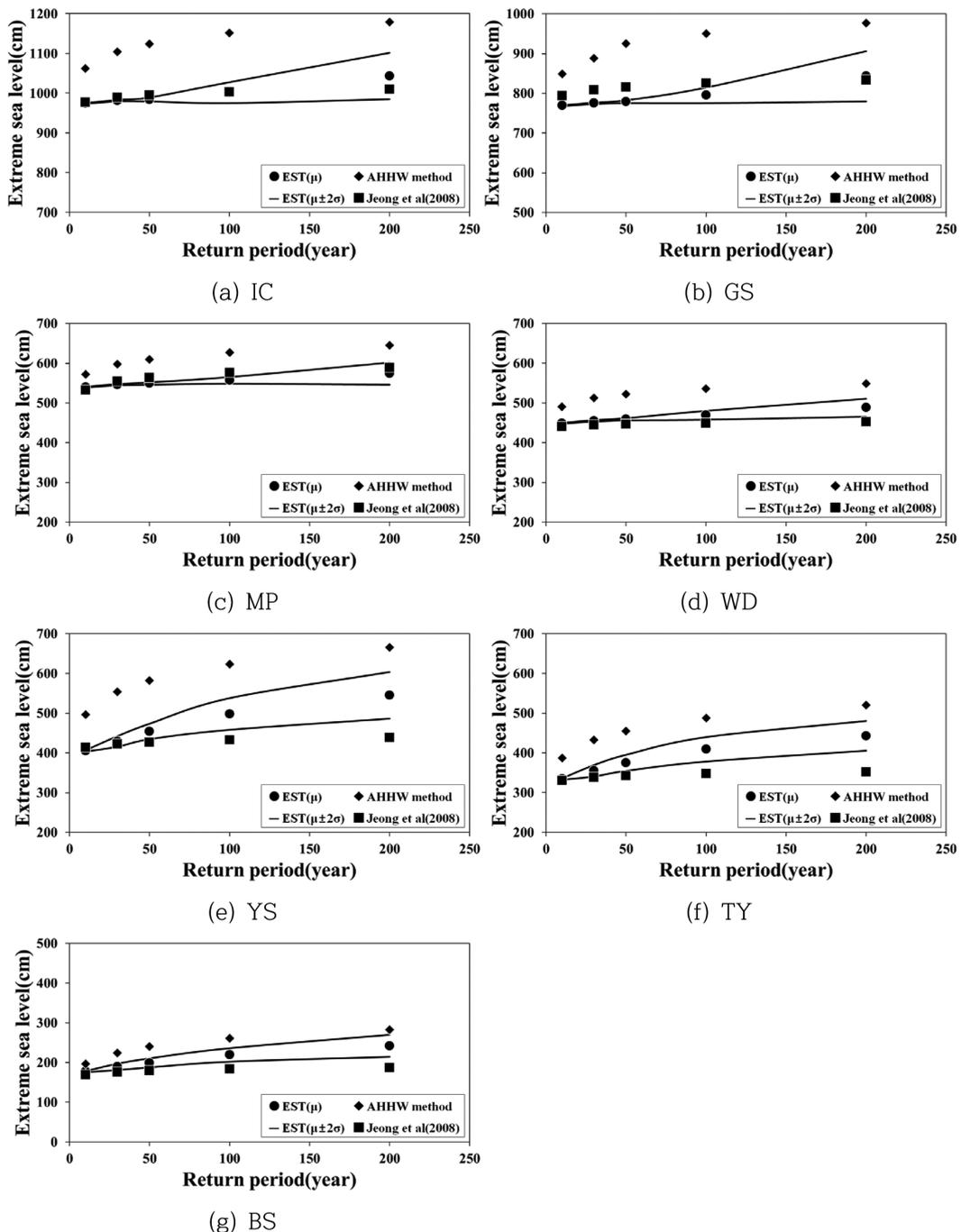


Fig. 4. Comparisons of the extreme sea levels.

어질수록 EST 방법의 95% 신뢰구간 범위내에 대부분 포함되고 있어 두 방법의 타당성을 상호입증하고 있다. 그러나 여수 등 3곳의 해일지배해역에서는 확률분포합수방법의 결과가 다음 절에 기술되는 대형태풍자료 누락과 관련되어 재현기간이 길어질수록 과소산정되는 경향을 보이고 있다. 이와 같이 EST 방법은 모든 해역에서 무난한 반면 다른 두 방법은 다음에 제시되는 문제점을 노정하고 있다.

4.3 기존방법의 한계

EST 방법으로 산출한 극치해면고 및 그 성분의 평균적인 상황은 앞에서 살펴본 바와 같다. 이렇게 산정된 극치해면고를 구성하는 성분인 조위와 해일고는 20년의 반복시행시마다 약간씩 달라지게 된다. 이때 약최고고조위방법이 타당하다면 EST 방법으로 산출한 각 지점의 200년 빈도 극치해면고를 구성하는 조위조건을 약최고고조위로 고정시킨 상태에서 극치해면고와 약최고고조위의 차가 200년 빈도 해일고가 되어야 한다. 그러나 인천의 경우 약최고고조위(Table 1 참조) 927 cm인 상태에서 Table 3에 제시된 1043 cm의 극치해면고가 발생하기 위해서는 116 cm의 태풍해일고가 형성되어야 하는데 이는 Table 1을 참조하면 200년 빈도는 커녕 10년 빈도에도 미달하는 수치이다. 같은 방식으로 약최고고조위의 조위상황에서 200년 빈도 극치해면고가 발생하는 해일고를 계산하면 군산, 목포, 완도 등의 경우 각각 100 cm, 86 cm, 88 cm 등으로 10년 빈도 정도를 보이고 있다. 즉, 약최고고조위 수준의 조위상황에서 200년 빈도 극치해면고가 발생하는 상황은 조석지배해역의 경우 약최고고조위에 10년 또는 그 이하의 해일고를 가산한 정도임을 보이고 있다. 여수, 통영, 부산에 동일한 방법으로 해일고를 산정하면 각각 183 cm, 161 cm, 112 cm 등으로 해일지배해역의 경우에도 약최고고조위 상황에서 200년 빈도 극치해면고가 발생하는 상황은 30~50년 빈도 정도의 해일고가 겹치는 정도임을 보이고 있다. 따라서 약최고고조위 상황에서 빈도별 해일고를 가산하게 되면 서해안은 물론이고 남해안에서도 매우 비현실적인 결과를 도출하게 된다. 이와 같이 조석과 해일의 결합확률을 고려하지 않고 약최고고조위로 통일하여 반영하는 것은 과대산정 우려가 매우 크기에 적용시 신중을 기해야 하며 특히 서해안과 같이 조석이 지배적인 곳에서의 약최고고조위방법의 적용은 가급적 지양되어야 한다.

확률분포합수방법의 특성분석을 위한 근거자료로 국내에서 발생한 역대태풍 중 남해안에 가장 큰 해일고를 유발했던 RUSA(0215)와 MAEMI(0314) 태풍에 의한 상륙지점 부근의 조위관측치를 수집하여 분석하였다. 태풍 RUSA(0215)는 소조기에 발생하여 상륙지점 인근인 여수와 통영 모두 해당연도의 최고극조위에도 미치지 못하는 결과를 보인 반면 대조기에 발생한 MAEMI(0314)의 경우 두 지점에서 모두 해당연도의 최고극조위를 기록하고 있다. 그러나 여수의 경우 태풍 MAEMI(0314)에 의해 393 cm의 연고극조위가 발생한 바

있는데 이는 평년수준의 연고극조위 정도에 불과하다. 따라서 이러한 자료들을 통해 확률분포합수방법으로 극치해면고를 산정한 결과는 전술한 바와 같은 비현실적 수치를 탈피하는데 도움이 되지 못하고 있다. 반면, 태풍 MAEMI(0314) 발생시 통영의 경우 관측기록사상 최고의 기록인 426 cm를 기록한 바 있는데, 이는 본연구 결과인 EST 방법에 의하면 재현기간 150년 정도로 평가되고 있으나 확률분포합수방법에 의하면 재현기간 200년의 극치해면고 352 cm를 훨씬 초과하는 수치로 나타나고 있어 확률분포합수방법 자체의 신빙성에 의문이 제기된다. 이 점에 대해서는 다양한 태풍-해일 자료를 통한 추가적인 분석이 필요하다. 또한 전술한 바와 같이 Bacopoulos(2017)의 연구에서도 1999년에 발생한 Floyd 태풍에 의한 해일고는 매우 컸지만 저조시에 발생하여 대표적 사상에 포함되지도 않았었고 2016년 발생한 기왕최대규모의 태풍인 Matthew의 경우 포함은 되었지만 높은 조위상황이 아니어서 해당태풍이 고조시에 발생할 경우 1,000년 빈도의 극치해면고가 발생할 수 있었지만 100년 빈도에 미달하고 있다는 연구결과가 제시된 바 있다. 이와 같이 조석이 지배적인 해역에서 확률분포합수방법으로 극치해면고를 산정할 경우 대형태풍에 의한 해일자료가 높지 않은 조위상황과 조우할 경우 해석결과에 전혀 반영이 안되거나 미미한 정도의 반영에 그칠 우려가 있다는 한계점을 내포하고 있다. 이러한 문제점은 Fig. 4에서도 나타나고 있듯이 해일이 지배적인 해역에서 확률분포합수방법의 빈도해석 결과가 재현기간이 커질수록 작은 결과값을 보이는 것과 일맥상통하고 있다.

5. 결 론

EST 방법을 통해 국내 서남해안 7개 지점에서의 조석과 해일특성을 고찰한 결과 서해안 및 서남해안에 위치한 인천, 군산, 목포, 완도 등은 30년 이하 빈도에서 조석기여율이 90%를 상회하고 있는 조석지배해역이며, 여수, 통영, 부산 등 남동해안에 위치한 지역에서는 30년 이상의 빈도에서 50% 정도의 조석기여율과 50% 이상의 해일재현율을 보이는 해일지배해역임을 시사하고 있다. 조석지배해역에서는 태풍해일이 발생하지 않아도 50년 이하의 재현기간을 갖는 극치해면고가 형성될 수 있는 반면 해일지배해역에서는 10년 재현기간에서만 태풍해일 없이 극치해면고가 형성될 수 있는 양상을 보이고 있다.

각 지역에서 극치해면고가 형성되는 평균적인 상황을 살펴보면 조석지배해역에서 50년 빈도 이하의 경우 약최고고조위를 크게 초과하는 조위조건에 20 cm에 미달하는 작은 해일고가 겹쳐 극치해면고가 형성되고 있으며 100년 빈도 역시 약최고고조위 수준의 조위조건에 10년 빈도에도 미달하는 태풍해일고가 겹쳐진 상황을 보이고 있다. 200년 빈도의 경우에도 약최고고조위에 다소 미달하는 조위조건에 10~30년 빈도 정도의 태풍해일이 겹쳐 극치해면고가 형성되고 있다. 반

면, 해일지배해역에서는 10년 빈도의 경우만 약최고고조위를 크게 초과하는 조위조건에 크지 않은 해일고가 가세하여 극치해면고가 형성되었을 뿐 30년 빈도 이상의 경우 빈도별로 조위조건은 큰 변화 없이 약최고고조위보다 약간 작거나 비슷한 수준에서 10년, 30년, 50년 정도의 해일이 겹쳐 50년, 100년, 200년 빈도의 극치해면고가 각각 형성되고 있음을 보이고 있다.

또한 설계조위 산정을 위한 세 가지 방법을 고찰한 결과 약최고고조위방법은 조석이 지배적인 서해안은 물론이고 남해안에서도 과다설계의 우려가 매우 큰 비현실적인 결과를 보이고 있어 조위와 해일의 발생확률 및 결합확률을 반영하는 개선안이 도출되지 않는 한 실무에서의 사용은 지양되어야 할 것이다. 확률분포합수방법은 조석과 해일이 함께 발생하는 기존 자료로부터 극치해면고를 산정하므로 자료기간이 충분할 경우 결과에 대한 신빙성이 매우 높은 방법이지만 대형태풍이 소조기나 저조시 발생할 경우 해당자료가 결과에 반영되지 않거나 매우 축소된 결과가 도출될 우려가 있기에 해일지배해역에 적용할 경우 세심한 주의가 요구된다. 더욱이 미래 기후변화를 반영하기가 쉽지 않아 지구온난화에 따른 슈퍼태풍 발생을 고려한 해석이 어렵기에 재현기간이 길어질수록 적용성에 한계가 드러나는 방법이다. 이러한 단점들을 극복하고 특히 서해안과 같이 조석이 지배적인 해역에 적용가능한 방법으로 EST 방법이 추천되고 있으며, 본 연구에서의 적용 결과 역시 국내 적용에 가장 바람직한 것으로 나타나고 있다. 즉, EST 방법은 약최고고조위의 발생확률이 불명확하다는 문제점은 물론이고 대형태풍에 의한 해일고 자료의 누락없이 미래기후변화까지 고려할 수 있기에 확률분포합수방법에 내재되어 있는 문제점까지도 극복할 수 있는 방법이다.

References

- Bacopoulos, P. (2017). Tide-surge historical assessment of extreme water levels for the St. Johns River: 1928-2017. *Journal of Hydrology*, 533, 624-636.
- Divoky, D. and Resio, D.T. (2007). Performance of the JPM and EST methods in storm surge studies. 10th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, and Coastal Hazard Symposium, North Shore, Oahu, Hawaii.
- Goring, D.G., Stephens, S.A., Bell, R.G. and Pearson, C.P. (2011). Estimation of extreme sea levels in a tide-dominated environment using short data records. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 137(3), 150-159.
- Hawkes, P.J., Gouldby, B.R., Tawn, J.A. and Owen, M.W. (2002). The joint probability of waves and water levels in coastal engineering design. *Journal of Hydraulic Research*, 40(3), 241-251.
- Jeong, S.T., Kim, J.D., Ko, D.H. and Yoon, G.L. (2008). Parameter estimation and analysis of extreme highest tide level in marginal seas around Korea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 20(5), 482-490 (in Korean).
- Kang, J.W., Joo, Y.-M., Cho, H. and Kweon, H.-M. (2014a). Spatio-temporal variability of AHHW in relation with the design sea level. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 26(2), 72-80 (in Korean).
- Kang, J.W., Kim, Y.S. and Choun, Y.-S. (2017). Estimation of probable maximum sea level at macro-tidal area. *Journal of Coastal Disaster Prevention*, 4(2), 93-100 (in Korean).
- Kang, J.W., Kim, Y.S., Cho, H.Y. and Shim, J.-S. (2011). Characteristics of nearshore surge-intensity. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 23(6), 458-465 (in Korean).
- Kang, J.W., Kim, Y.-S., Cho, H. 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), 381-389 (in Korean).
- Kang, J.W., Kim, Y.-S., Yoon, Y.-K. and Shim, J.-S. (2014b). Appearance of tide-surge interaction along the West/South Coasts. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Eng.*, 26(6), 352-358 (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (2009). Technical standards and commentaries for port and harbor facilities in Japan (Japanese version).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010). Development of storm surge and tsunami prediction system and estimation of design water level for major ports in Korea (in Korean).
- Ministry of Oceans and Fisheries (2014). Design criteria for harbors (in Korean).
- Pugh, D. (2004). *Changing sea levels; Effects of tides, weather and climate*, Cambridge University Press, Cambridge.
- 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.
- Scheffner, N.W., Clausner, J.E., Militello, A., Borgman, L.E., Edge, B.L. and Grace, P.J. (1999). Use and application of the empirical simulation technique; User's guide. US Army Corps of Engineers.
- Toro, G.R., Resio, D.T., Divoky, D., Niedoroda, A.W. and Reed, C. (2010). Efficient joint-probability methods for hurricane surge frequency analysis. *Ocean Engineering*, 37, 125-134.
- 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 24 April, 2018

Accepted 10 May, 2018