

하계 해수면 상승이 폭풍해일고 분석에 미치는 영향 Effect of Summer Sea Level Rise on Storm Surge Analysis

김아정* · 이명희** · 서승원***

A Jeong Kim*, Myeong Hee Lee** and Seung Won Suh***

요지 : 태풍은 7~10월에 집중적으로 발생하며, 이 시기에 해수면도 가장 높게 나타난다. 특히 우리나라 하계 해수면은 연평균과 비교했을 때 서해안 약 14.5 cm, 남해안 약 9.0~14.5 cm, 동해안 약 9.0 cm 내외로 더 높게 나타난다. 하계에 상승하는 해수면과 대형 태풍이 겹치면 연안 저지대에 침수, 범람 등의 피해를 야기할 수 있다. 따라서 연안 저지대의 피해를 저감하기 위해 해안 구조물 설계 및 안정성 검토 시 정확한 해일고 산정이 필수적이다. 본 연구에서는 태풍이 영향을 미친 하계 해수면 상승이 고려된 해당 월의 평균 해수면으로부터 산정된 해일고(SH_m)를 산정하고 이를 연평균 해수면이 고려된 기존 해일고(SH_a)와 비교하여 특이현상 분석의 타당성을 재검토하였다. 연구 결과, 연평균 해수면 대비 해수면 상승 폭이 가장 큰 8~9월에 발생한 BOLAVEN(SANBA)의 직접 영향을 받은 남서(남동)해안에서 SH_a, SH_m의 해일고(cm) 차이는 7.8~24.5(23.6~34.5), 간접 영향권에 속한 남동(남서)해안에서 -1.0~0.0(8.3~12.2)로 나타난다. 그러나, 연평균 및 월평균 해수면이 비슷한 높이를 가지는 10월에 남동해안에 직접적 영향을 미친 CHABA(KONG-REY)의 경우 5.2~14.2(19.8~21.6), 간접 영향을 미친 서해안에서 3.2~6.3(-3.2~3.7)으로 직·간접 영향권 모두 SH_a와 SH_m의 차이가 작아진다. 연평균 해수면을 기준으로 산정한 기존 해일고는 상승된 하계 해수면이 고려되지 못하여, 실제 태풍 시 발생하는 해일고에 비해 과대 산정된 것으로 평가된다. 따라서 정확한 해일고 개념 정립과 함께 기존의 연평균 해수면을 고려한 해일고 기준으로 설계된 연안 시설물 마루높이 등의 타당성 검토가 재논의되어야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 연평균 해수면, 하계 해수면 상승, 해일고, 태풍

Abstract : Typhoons occur intensively between July and October, and the sea level is the highest during this time. In particular, the mean sea level in summer in Korea is higher than the annual mean sea level about 14.5 cm in the west coast, 9.0 to 14.5 cm in the south coast, and about 9.0 cm in the east coast. When the rising the sea level and a large typhoon overlap in summer, it can cause surges and flooding in low-lying coastal areas. Therefore, accurate calculation of the surge height is essential when designing coastal structures and assessing stability in order to reduce coastal hazards on the lowlands. In this study, the typhoon surge heights considering the summer mean sea level rise (SH_m) was calculated, and the validity of the analysis of abnormal phenomena was reviewed by comparing it with the existing surge height considering the annual mean sea level (SH_a). As a result of the re-analyzed study of typhoon surge heights for BOLAVEN (SANBA), which influenced in August and September during the summer sea level rise periods, yielded the differences of surge heights (cm) between SH_a and SH_m 7.8~24.5 (23.6~34.5) for the directly affected zone of south-west (south-east) coasts, while for the indirect south-east (south-west) coasts showed -1.0~0.0 (8.3~12.2), respectively. Whilst the differences between SH_a and SH_m of typhoons CHABA (KONG-REY) occurred in October showed remarkably lessened values as 5.2~ 14.2 (19.8~21.6) for the directly affected south-east coasts and 3.2~6.3 (-3.2~3.7) for the indirectly influenced west coast, respectively. The results show the SH_a does not take into account the increased summer mean sea level, so it is evaluated that it is overestimated compared to the surge height that occurs during an actual typhoon. Therefore, it is judged that it is necessary to re-discuss the feasibility of the surge height standard design based on the existing annual mean sea level, along with the accurate establishment of the concept of surge height.

Keywords : annual mean sea level, summer seasonal sea level rise, surge height, typhoon

*(주)더해본 연구원(Research Scientist, The sea-born eXperts)
**군산대학교 해양산업공학과 석사과정(Master Course, Department of Ocean Science & Engineering, Kunsan National University)
***군산대학교 해양건설공학과 교수, (주)더해본 대표이사(Corresponding author: Seung Won Suh, Professor, Department of Coastal Construction Engineering, Kunsan National University, 558 Daehak-ro, Gunsan 54150, Korea, Tel: +82-63-469-1713, Fax: +82-63-469-7449, suh@kunsan.ac.kr; CEO, The sea-born eXperts, 558 Daehak-ro, Gunsan 54150, Korea)

1. 서 론

IPCC(2014) 보고서에 따르면 지구온난화에 의해 대기과 해양의 온도 및 해수면이 지속적으로 상승하고 있다. 그러나, 해수면은 계절적 및 연간 변화를 보이고 Menéndez and Woodworth(2010), Marcos et al.(2012), Watson(2015) 등의 연구에서 이를 다룬 바 있다. 우리나라 주변 해역의 해수면 상승 또한 Jung(2014), Yoon and Kim(2012) 등의 연구에서 다루어졌고, Kim and Suh(2019)는 하계에 우리나라 서해안 해수면 상승의 특성을 분석한 바 있다. Kang and Lee(1985)에 의하면 한국 연안 평균 해수면이 여름에 높고 겨울에 낮은 이유가 대기압 및 해수밀도 변화에 기인하는 것으로 파악하고 있다. 일반적으로 해수의 변동은 조석, 기상, 수온, 염분, 파랑, 지형 등 다양한 요인에 의해 영향을 받는데, 조석 외력 조건 중 대기압 변화가 수위 변화를 유발하는 큰 요인 중 하나이다 (Hyun et al., 2016). 또한, 해수면 및 태풍과 관련하여 Emanuel et al.(2008)의 연구에서 지구온난화로 인한 태풍의 강도와 빈도가 증가하여 미래에는 태풍으로 인한 피해가 더 심각해질 것이라고 경고하고 있다. Kang et al. (2008a)의 연구에서도 21세기 들어 RUSA(TY0215)와 MAEMI(TY0314) 등 초대형 태풍의 발생이 잦아지고 있으며, 1990년대에 비해 서남해안의 최대해일고가 크게 증가하고 있다고 언급하였다.

해양수산부 연안포털(<https://coast.mof.go.kr>)은 2012~2018년 자연재해 원인별 피해 현황 중 연안 지역의 피해가 전국 대비 73.2%를 차지하며, 전체 자연재해 중 태풍에 의한 피해가 73.8%로 가장 큰 원인이라고 적시하고 있다(Ministry of Oceans and Fisheries, 2021). 따라서 육지부 해안선이 58.1%를 차지하고 있는 우리나라는 해안선에 인접한 연안 지역에서 태풍 등과 같은 자연재해에 노출되는 위험성이 크다. 또한 기상청 날씨누리(<https://www.weather.go.kr>)의 태풍 발생통계에서 제시한 1951~2020년의 월별 태풍 발생 현황 자료를 살펴보면, 7~10월에 발생한 태풍 비율이 69.1%로 집중되어 있음을 확인할 수 있다(Korea Meteorological Administration Weather Nuri, 2021). 태풍은 대부분 7~10월에 발생하며, 이 시기는 해수면이 가장 높아지는 시기인 하계와 겹친다(Kim and Suh, 2019). 해수면이 상승한 하계에 태풍과 조석이 상호 작용하고, 고조와 겹치면 침수 및 범람 등의 피해로 이어질 수 있다. 실제로 우리나라에 발생한 2016년 태풍 CHABA(TY1618)는 부산 마린시티에 월과 범람을 야기한 바 있다(Suh and Kim, 2018). 따라서 폭풍해일로 인한 연안 범람 등의 재해 위험을 정확히 예측하고 평가하기 위해서는 하계 해수면 상승과 함께 폭풍해일고의 정확한 산정 및 평가가 중요하다.

태풍은 발생부터 소멸 때까지 보통 1주일~10일, 길게는 약 20일의 수명을 가진다(Wikipedia, 2021). 태풍의 중심은 주변에 비해 기압이 낮기 때문에 수위가 상승하게 되고, 여기에 강풍

과 조석이 더해져 조위가 평상시보다 높아지게 된다. 이와 같이 특이 기상 발생에 의해 급상승하는 수위를 폭풍해일이라고 한다. 특히 고조가 만조 때와 겹치거나 수심이 낮고, 썰기형만이 위치한 지형일수록 태풍 에너지가 수렴되어 해일고가 증가하면서 그 위험이 커진다. 우리나라의 경우 하계 수온 상승에 의한 열팽창의 영향으로 해수면이 타 계절에 비해 상대적으로 높게 나타나며, 백중사리시에는 저기압 통과만으로도 연안 저지대의 범람 피해가 우려되는 실정이다(Kang et al., 2015).

태풍해일고(또는 태풍에 의한 폭풍해일고)는 태풍에 동반되는 기상 조위 중 하나로서 태풍 중심 저기압에 의한 해수면 상승과 태풍 동반 강풍에 의하여 해수가 연안 쪽으로 밀려 올라가는 현상(wind setup)의 중첩으로 발생한다(Kang et al., 2015; Ku et al., 2019). 조위 편차(tidal residual)는 조위 관측치와 예측치의 차이로, 조위 편차 성분은 전적으로 해일에 의한 성분으로 간주함이 일반적이거나 조위 편차와 해일고는 의미상의 구분 없이 혼용되고 있다(Kang et al., 2013). 우리나라의 경우 태풍이 발생한 해에는 국립해양조사원(KHOA, Korea Hydrographic and Oceanographic Agency) 전자도서관(KHOA, 2012a; 2012b; 2016; 2018)에 특히 해양현상 분석 보고서를 발간하고 있다. 특히 해양현상 분석 보고서에서는 폭풍해일고를 ‘연평균 해수면 기준으로 변동된 이상 값’이라 정의하여 산정한 결과를 수록하고 있다. 그러나, 연평균 해수면(Annual MSL, Annual Mean Sea Level)은 하계뿐만 아니라 동계의 해수면까지 포함되어 계산되기 때문에 하계 평균 해수면보다 낮게 산정된다. 이로 인해 연평균 해수면을 기준으로 산정한 예측 조위는 월평균 해수면을 고려한 예측 조위와 다르게 나타나 특이 기상 시 관측 조위와의 조위 편차가 더 크게 계산될 수 있다. 연평균 해수면을 기준으로 취한 폭풍해일고(Surge Height considering annual MSL, SH_a)는 하계 월평균 해수면을 기준으로 한 해일고(Surge Height considering monthly MSL, SH_m)보다 과대 추산될 우려가 있다. 따라서, 해일고의 사전적 정의에 따라 실제 태풍이 발생한 해당 월평균 해수면으로부터 변동된 값을 실제 해일고로 정의하고, 해일고 산정에 하계 시 상승된 해당 월의 해수면 값을 고려하는 과정이 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 하계 해수면 상승이 해일고 분석에 미치는 영향을 평가하기 위해 실제 태풍이 내습한 시점의 월평균 해수면과 연평균 해수면으로부터 해일고를 산정하여 상호 비교하였다. 이를 기존 특이 해양현상 분석 보고서와 비교 검토하고, 연평균 대비 하계 평균 해수면 상승치를 해역별로 분석하였다. 아울러 해수면과 수온 및 해면 기압의 연관성에 대해 파악하고자 해역별로 해수면과 수온 및 해면 기압의 상관관계도 분석하였다. 앞서 언급한 태풍 발생통계에 따라 본 연구에서는 태풍이 집중되어 발생하는 시기인 7~10월의 기간을 하계로 정하여 분석하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 해수면, 수온, 해면 기압

해역별 연평균 및 하계 평균 해수면의 특성 비교를 위해 서해안의 인천, 군산, 목포, 남해안의 제주, 여수, 부산, 동해안의 울산, 목호, 속초로 총 9개 지점의 주요 조위관측소를 선정하였다. 분석에는 국립해양조사원에서 관측기록이 30년 이상 확보된 해당 조위관측소의 조위 관측자료를 이용하였다. 조위 관측자료는 지점마다 관측기간이 상이하고, 결측자료도 각 지점마다 다르게 존재하는 특이성이 있는 등 자료 동질성에 한계가 존재한다.

해수면은 수온 및 해면 기압에 따라 연중 변화를 보이므로 해수면과 매달 변화하는 수온 및 해면 기압의 상관관계를 분석하기 위해, 국립해양조사원에서 제공하는 월별 수온 및 해면 기압 자료를 이용하였다. 수온과 해면 기압 자료는 조위 자료와 달리 2000년부터 제공되고 있다. 본 연구에서는 수온 및 해면 기압과 해수면 변동과의 상관성을 살펴보기 위해, 해수면 관측자료도 동일한 최근의 자료를 활용하였다. 해수면과 수온 및 해면 기압의 관측자료 개시년도 및 본 연구에 활용한 자료를 Table 1에 제시하였다. 한 예로 인천 지점의 경우 1959년부터 관측을 개시하였지만, 분석에는 2000년 이후 자료를 이용하였다.

해수면과 수온 및 해면 기압의 상관관계 분석은 R script의 관련 함수를 이용하여 평가하였다. 해수면과 수온, 해수면과 해면 기압과의 상관관계는 피어슨 상관계수, p-value(Birbaum, 1961), 오차 해석 등을 통해 파악할 수 있다. 피어슨 상관계수는 두 변수 간의 관련성을 구하기 위해 보편적으로 이용되

며, 상관계수가 0.6~0.8 사이라면 상관관계가 높다고 평가할 수 있고, 0.8~1.0이면 상관관계가 매우 높다고 알려져 있다 (Cha and Kim, 2018). 또한, 상관관계의 여부를 확인하기 위해 p-value 유의수준과 비교하였다. p-value가 0.05 이하이면 상관계수는 유의하다고 판단한다(Kim et al., 2020).

2.2 최대해일고 산정

폭풍으로 인한 해일고를 산정하기 위해 국립해양조사원은 매년 관측된 자료를 이용해 조화분해하고, 이를 토대로 조화 합성하여 조위 편차를 산정하고 있다. 그러나 하계에는 평균 해수면이 상승하기 때문에 이와 같은 방법은 해일고가 과대 분석될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 매월 관측된 자료와 매년 관측된 자료를 이용해 해일고를 산정하고 그 차이를 비교 분석하였다. 최대해일고는 실제 관측된 조위자료에서 조화 분조를 이용하여 합성한 조석 예측치를 뺀 조위 편차 중 가장 높게 나타나는 해일고를 의미한다. 특히 해양현상 분석 보고서에서는 1년 1시간 조위 관측자료를 조화분해 후 1분 간격으로 합성하여 예측 조위를 산정한다. 본 연구에서는 해일고 산정 시 실제 하계 때 상승하는 해수면의 영향을 고려하기 위해 국립해양조사원에서 공개되는 월별 1시간 간격 조위 관측자료를 이용하였다. 해석의 일관성을 기하기 위해 국립해양조사원과 동일하게 Task_2000 package(Bell et al., 2000)로 조석 조화분해를 수행하였다. 본 연구와 특히 해양현상 분석 보고서의 해일고 산정 방법의 차이점 비교는 Table 2에 제시한 바와 같다.

특히 해양현상 분석 보고서는 2012년부터 제공되고 있어, 본 연구에서도 2012년 이후 발생한 태풍을 대상으로 비교 분석

Table 1. Recording year of sea level, water temperature, and sea level pressure for the selected major tidal stations up to 2020

Station	Sea level record		Water temperature record		Sea level pressure record		
	Since	Analyzed in this study	Since	Analyzed in this study	Since	Analyzed in this study	
West Coast	Incheon	1959	1999	1959	2000	1959	2000
	Gunsan	1980	1980	1980	2007	1980	2003
	Mokpo	1956	1956	1956	2002	1956	2002
South Coast	Jeju	1964	1964	1964	2001	1964	2002
	Yeosu	1965	1965	1965	2000	1965	2009
	Busan	1956	1960	1956	2001	1956	2002
East Coast	Ulsan	1962	1962	1962	2000	1962	2007
	Mukho	1965	1965	1965	2000	1965	2006
	Sokcho	1973	1973	1973	2000	1973	2006

Table 2. The difference between present study and the analysis method of the oceanic abnormal phenomena report (KHOA, 2012a; 2012b; 2016; 2018)

Item	Present study	Oceanic abnormal phenomena report (KHOA)
Duration of obs. data	1 month	369 days + 1 hour
Reference sea level	Monthly mean sea level	Annual mean sea level
Tide analysis program	Task_2000 package	Task_2000 package

하였다. 비교 분석에 쓰인 태풍은 우리나라 서남해안에 영향을 크게 끼친 태풍 BOLAVEN(TY1215), SANBA(TY1216), CHABA(TY1618), KONG-REY(TY1825)이다. 월평균 및 연평균 해수면을 기준으로 산정한 해일고 비교는 우리나라 주요 조위관측소에 대해 실시하였다.

그러나, 특히 해양현상 분석 보고서에서는 실제 태풍의 영향권에 속한 지점만을 대상으로 해일고를 분석하고 있다. 예를 들면 2012년 서해안에 영향을 끼친 태풍 BOLAVEN(TY1215)의 경우 서해안의 조위관측소와 제주 조위관측소까지의 분석만 존재하며, 남해안과 동해안에 대한 해일고 분석이 존재하지 않는다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 본 연구에서는 특히 해양현상 분석 보고서에 분석되어 있지 않은 지점까지도 특히 해양현상 분석 보고서의 분석 방법과 동일하게 1년 1시간 간격 조위 관측자료를 이용하여 해일고를 산정하고 추가 분석하였다. 1년 및 1달 조위 관측자료를 이용한 예측 조위는 식(1)과 같이 계산된다.

$$y(t) = S_0 + \sum_{n=1}^n f_n h_n \cos[w_n t + (V_n + u_n) - k_n] \quad (1)$$

여기서, $y(t)$ 는 예보 조위, S_0 는 연평균 및 월평균 해수면을 나타낸다. f_n 은 기조력의 장주기를 보정하기 위한 변수이고 h_n 은 각 주기함수의 진폭을 위한 변수이다. 주기와 관련된 파라미터로 각 속도를 나타내는 w_n 과 위상을 나타내는 V_n , 위상을 보정하기 위한 u_n , 그리고 각 주기함수의 지각을 의미하는 k_n 이 사용된다(Pugh, 1987; Park, 2018). 본 연구에서는 1년의 경우 63개의 분조를 이용하며, 1달의 경우 27개 분조에 대한 파라미터는 최소자승법을 이용하여 계산하였다.

3. 분석 결과

3.1 하계 평균 해수면 상승 원인 분석

하계 평균 해수면이 상승되는 직·간접적 원인을 파악하기 위해 월평균 해수면과 월별 수온 및 해면 기압 변동의 상관성을 분석하였다. 분석 결과, 본 연구의 모든 분석 지점에서 p-value가 2.2×10^{-16} 이하의 확률을 보였다. p-value는 관찰된 데이터의 검정통계량이 귀무가설을 지지하는 정도를 확률로 표현한 값이며, 2.2×10^{-16} 이하의 확률은 매우 작은 확률

Table 3. Pearson's correlation coefficients between sea level, water temperature, and sea level pressure for selected major tidal stations (2000–2020)

Stations		Pearson's correlation coefficients between sea level and water temperature	Pearson's correlation coefficients between sea level and sea level pressure
West Coast	Incheon	0.95	-0.81
	Gunsan	0.94	-0.72
	Mokpo	0.91	-0.75
South Coast	Jeju	0.84	-0.67
	Yeosu	0.94	-0.71
	Busan	0.88	-0.63
East Coast	Ulsan	0.83	-0.70
	Mukho	0.84	-0.66
	Sokcho	0.83	-0.70

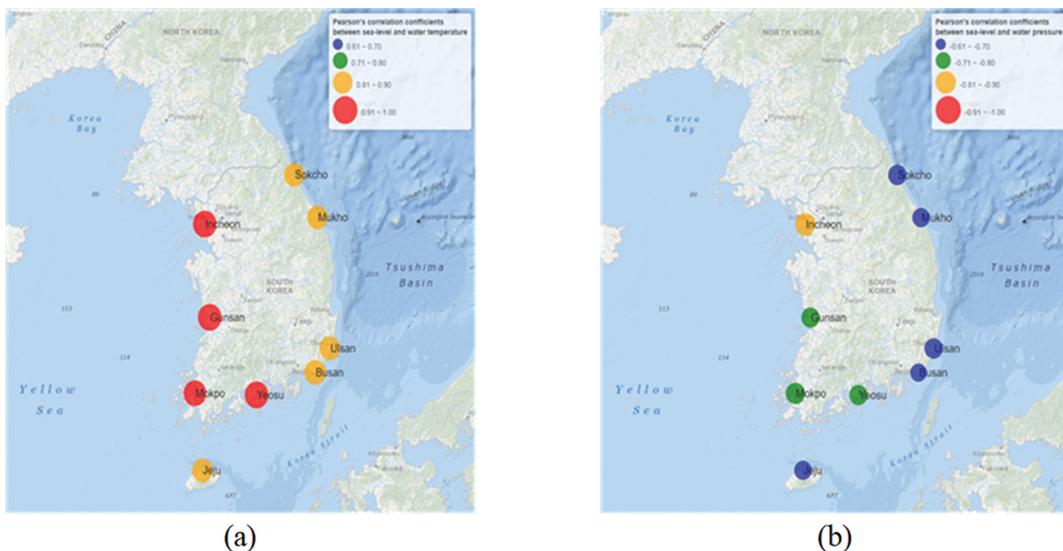


Fig. 1. Pearson's correlation coefficients between sea level and water temperature (a), and sea level pressure (b).

로 귀무가설을 기각한다. 이는 수온 및 해면 기압이 평균 해수면과 상관관계가 있음을 의미한다. 즉, 하계에 상승된 수온과 열팽창에 의해 평균 해수면이 직접 비례하여 상승함을 나타내는 결과로 인식된다.

조위관측소별 해수면과 수온 및 해면 기압의 피어슨 상관계수는 Table 3와 같으며, 해역별로 상관계수를 살펴보기 위해 Fig. 1에 도시하였다. 해수면과 수온의 상관계수는 서해안의 인천, 군산, 목포에서 각각 0.95, 0.94, 0.91이며, 남해안의 제주, 여수, 부산에서는 0.84, 0.94, 0.88로 나타났다. 이어서 동해안의 울산, 목호, 속초에서는 0.83, 0.84, 0.83으로 해수면과 수온의 상관관계는 양의 관계에 있다. 해수면과 수온의 해역별 상관계수는 서해안 0.93, 남해안 0.89, 동해안 0.83으로 모든 지점에서 0.80 이상으로 나타나 매우 높은 상관관계가 있는 것으로 분석되었다.

해수면과 해면 기압의 상관계수를 살펴보면 서해안의 인천, 군산, 목포에서 -0.81, -0.72, -0.75, 남해안의 제주, 여수, 부산에서 -0.67, -0.71, -0.63, 동해안의 울산, 목호, 속초에서 -0.70, -0.66, -0.70으로 분석되었다. 해역별 해수면과 해면 기압의 상관계수는 서해안에서 -0.76, 남해안과 동해안에서 각각 -0.67, -0.69이며, 해수면과 해면 기압은 음의 상관관계를 갖는다. 해수면과 해면 기압도 높은 상관성을 보이지만, 해수면과 수온처럼 강한 상관성을 갖지는 않는 것으로 분석된다.

분석 결과, 모든 해역에서 해수면과 수온 및 해면 기압의

상관관계가 매우 높게 나타났지만, 서해안이 가장 큰 상관성을 보였다. 그 이유는 반폐쇄 해역인 서해안 특성상 남해안과 동해안에 비해 하계 수온 상승이 해수면 상승의 주된 원인으로 이해할 수 있다.

실제로 해수면과 수온이 양의 상관관계, 해면 기압이 음의 상관관계에 해당하는지 살펴보기 위해 조위관측소 중 대표적으로 인천 지점에 대해 해수면, 수온, 해면 기압을 boxplot으로 시각화하였다. 월별로 도시된 Fig. 2의 해수면은 계절 변동을 보이며, 1년 중 8월에 가장 높고 1~2월에 가장 낮게 나타난다. 이와 유사하게 수온 변동도 1~2월에 가장 낮고 3월부터 점차 높아져 8월에 가장 높은 온도를 보인다. 이는 수온 상승으로 인한 해수면의 열팽창 효과로, 해수면과 수온은 양의 비례관계에 해당함을 의미한다. 해면 기압은 해수면 및 수온과는 반대로, 1월과 12월에 가장 높고 7월에 가장 낮게 나타나 해수면과 반비례관계에 있음을 용이하게 파악할 수 있다. 해수면과 1~1.5달의 위상 차이를 보이며 인천 지점의 경우 7월에 연중 가장 낮은 기압을 가지는 것으로 분석되었다. 이와 같은 결과는 하계 해수면 상승이 역기압 효과(inverse barometric effect)에 의해 발생됨을 제시한 Suh and Kim (2019)의 연구 결과와 상응하는 것이다.

3.2 연평균 및 하계 평균 해수면

하계 해수면이 상승하여 해일고 분석에 영향을 미치는지 파악하기 위해 태풍이 집중되어 발생하는 7~10월을 대상으로

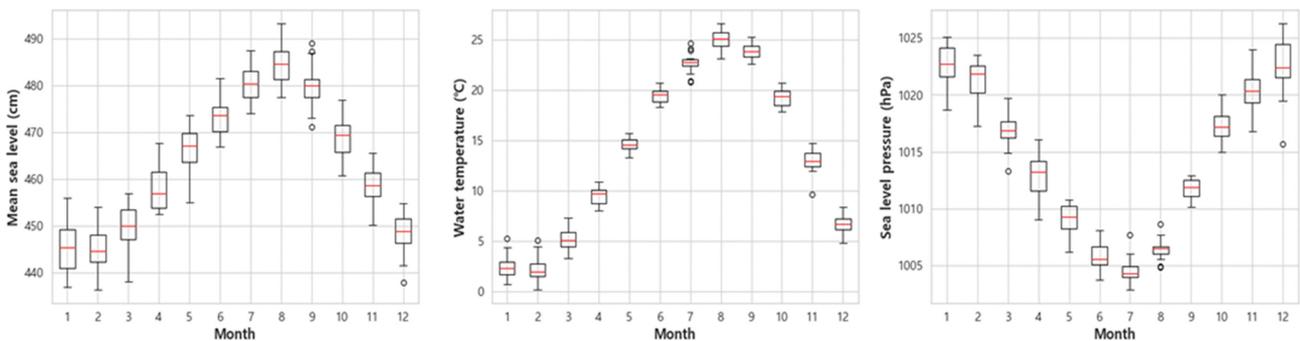


Fig. 2. Monthly variations of MSL, water temperature, and sea level pressure at Incheon tidal station.

Table 4. Annual MSL and summer seasonal MSL and their differences for selected major tidal stations (1960 ~ 2020)

Station	Lat. (°)	Lon. (°)	Annual MSL (cm) (a)	Summer seasonal MSL (cm) (b)	Differences (cm) (b)-(a)
West Coast	Incheon	126.60	459.29	474.76	15.47
	Gunsan	126.71	367.79	382.51	14.71
	Mokpo	126.38	241.25	255.85	14.60
South Coast	Jeju	126.54	152.74	167.15	14.42
	Yeosu	127.75	183.49	197.35	13.86
	Busan	129.06	69.75	79.06	9.31
East Coast	Ulsan	129.39	32.68	41.99	9.31
	Mukho	129.11	19.36	28.49	9.13
	Sokcho	128.60	23.58	33.32	9.74

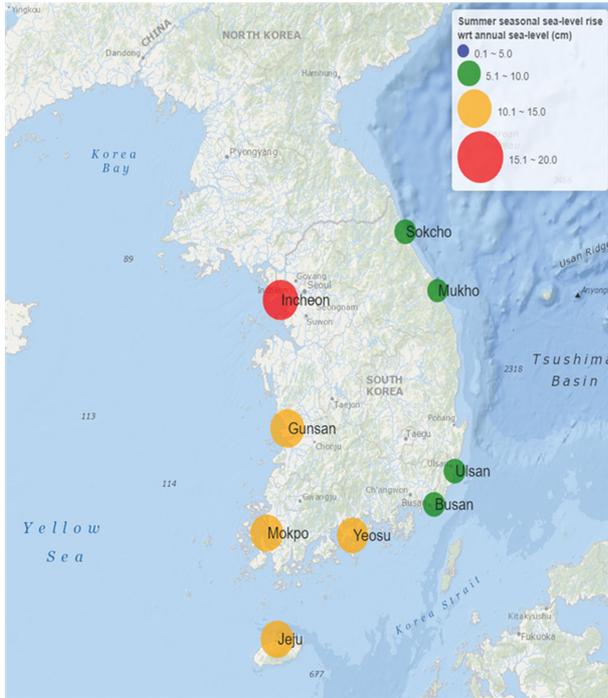


Fig. 3. Summer seasonal MSL rise (cm) with respect to annual MSL.

연평균 대비 하계 평균 해수면 상승을 분석하였다. 7~10월 중 특정 달을 지정하여 해수면을 분석하기에는 태풍 발생 기간이 모두 상이하여 일관성 유지에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 태풍이 집중되는 기간을 모두 고려하기 위해 7~10월을 하계로 지정하여 분석하였다. 전술한 바와 같이 각 해역별 9개 지점에 대해 1960~2020년 기간 동안 연평균 및 하계 평균 해수면을 분석하면, Table 4에 제시한 것처럼 해역별 차이는 있지만 하계 평균 해수면이 연평균 해수면에 비해 상승함을 알 수 있다. 연평균 및 하계 평균 해수면 차이는 서해안의 인천, 군산, 목포에서 15.5 cm, 14.7 cm, 14.6 cm로 나타났으며, 남해안의 제주, 여수, 부산에서는 14.4 cm, 13.9 cm, 9.3 cm로 서해안에 비해 작은 값을 보였다. 동해안의 울

산, 묵호, 속초는 각각 9.3 cm, 9.1 cm, 9.7 cm로 서남해안에 비해 낮은 값을 나타냈다. 해역별 하계 해수면 상승은 서해안에서 약 14.5 cm 이상, 남해안에서 약 9.0~14.5 cm, 동해안에서 약 9.0 cm 내외로 해역별, 위도별 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 공간적인 위치에 따른 특징은 연평균 대비 하계 평균 해수면 상승치를 도면에 표시한 Fig. 3에서 보는 바와 같이 서해안의 중부해역에서 남해안을 거쳐 동해안으로 갈수록 연평균 대비 하계 해수면 상승 폭이 작아진다.

3.3 연평균 및 월평균 해수면

하계 해수면 상승이 해일고 분석에 미치는 영향을 분석하기 위해 태풍이 발생한 당시 연평균 해수면과 월평균 해수면 및 두 값의 차이를 계산하여 Table 5에 제시하였다. 연평균 및 월평균 해수면 차이는 태풍의 진행 경로에 따라 차이가 확연히 나타나는 것을 알 수 있다. 서해안을 따라 진행된 태풍 BOLAVEN(TY1215)의 경우, 인천, 군산, 목포 지점에서 연평균 및 월평균 해수면의 차이가 모두 20.0 cm 이상으로 남해안 및 동해안에 비해 가장 크게 분석되었고, 인천 지점에서 27.4 cm의 최대값이 나타났다. 남해안과 동해안에 영향을 미쳤던 태풍 CHABA(TY1618)와 KONG-REY(TY1825)의 영향으로 9개의 지점 중 제주, 여수, 부산 등에서 연평균 및 월평균 해수면 차이가 가장 크게 발생했고, 여수 지점에서는 이들 태풍의 영향으로 연평균 대비 월평균 해수면 상승치가 각각 11.3 cm, 5.1 cm로 최대값을 나타냈다. 태풍 SANBA(TY1216)는 여수에서 속초까지 관통하는 경로로, 남해안과 동해안에 영향을 끼쳤다. 이로 인해 연평균 및 월평균 해수면 차이가 서해안 14.4~17.7 cm, 남해안 13.1~16.9 cm, 동해안 8.3~12.5 cm로 서남동해안에서 모두 크게 나타났다. 태풍 SANBA(TY1216)의 경로는 남해안과 동해안으로 진행되지만, 해역 중 서해안에서 연평균 대비 월평균 해수면 차이가 가장 크게 나타났다. 이는 전술한 바와 같이 서해안이 남동해안보다 수온과 해수면의 상관관계가 매우 높아 하계 해수면 상승 폭이 크기 때문으로 판단된다. 따라서 남동해안 지점들은 태풍의 영

Table 5. Annual and monthly MSL for typical typhoons

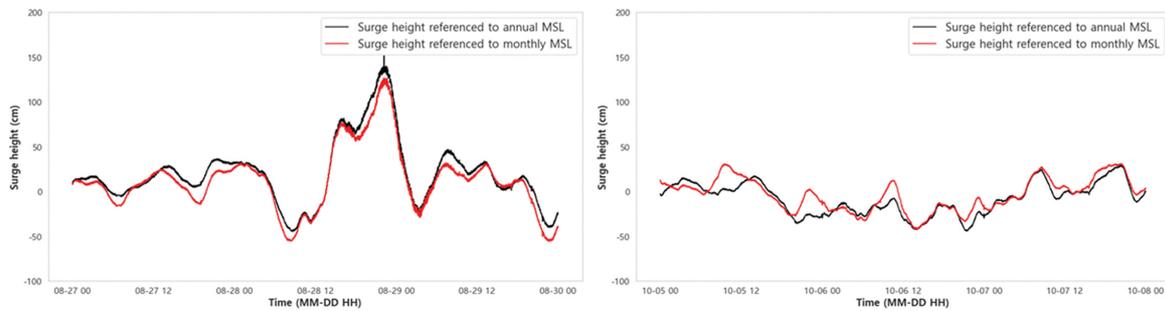
Station	BOLAVEN (TY1215)			SANBA (TY1216)			CHABA (TY1618)			KONG-REY (TY1825)			
	A* (cm)	M* (cm)	D* (cm)	A* (cm)	M* (cm)	D* (cm)	A* (cm)	M* (cm)	D* (cm)	A* (cm)	M* (cm)	D* (cm)	
West Coast	Incheon	465.9	493.3	27.4	465.9	481.6	15.7	467.3	475.0	7.7	463.3	464.1	0.8
	Gunsan	371.0	396.6	25.6	371.0	388.7	17.7	374.9	382.5	7.6	370.1	371.7	1.6
	Mokpo	251.0	271.5	20.5	251.0	265.4	14.4	253.5	253.9	0.4	245.2	248.8	3.6
South Coast	Jeju	166.6	186.6	20.0	166.6	181.3	14.7	167.4	178.3	10.9	162.7	167.1	4.4
	Yeosu	188.3	209.7	21.4	188.3	205.2	16.9	191.7	203.0	11.3	185.5	190.6	5.1
	Busan	74.8	90.6	15.8	74.8	87.9	13.1	77.3	82.1	4.8	72.6	77.2	4.6
East Coast	Ulsan	36.2	50.2	14.0	36.2	48.7	12.5	40.4	45.7	5.3	34.3	37.3	3.0
	Mukho	23.5	36.5	13.0	23.5	31.8	8.3	28.4	29.7	1.3	21.5	25.3	3.8
	Sokcho	30.1	43.9	13.8	30.1	39.8	9.7	32.6	33.3	0.7	26.3	28.5	2.2

* A: Annual MSL, M: Monthly MSL, D: Differences of annual and monthly MSL

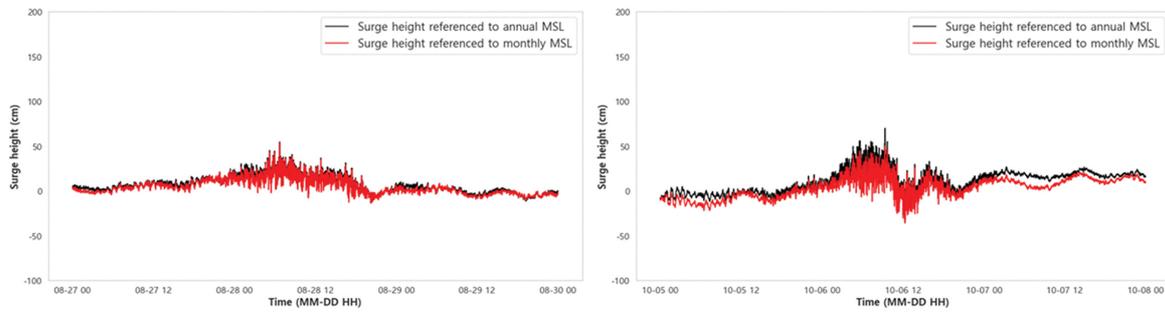
Table 6. Maximum surge heights referenced to annual (KHOA, oceanic abnormal phenomena report) and montly MSL (present study) for typical typhoons

Station	BOLAVEN (TY1215)			SANBA (TY1216)			CHABA (TY1618)			KONG-REY (TY1825)			
	A* (cm)	M* (cm)	D* (cm)	A* (cm)	M* (cm)	D* (cm)	A* (cm)	M* (cm)	D* (cm)	A* (cm)	M* (cm)	D* (cm)	
West Coast	Incheon	151.5	127.0	24.5	39.1	30.8	8.3	33.5	30.3	3.2	24.2	27.4	-3.2
	Gunsan	124.5	101.1	23.4	40.2	29.9	10.3	46.8	41.1	5.7	22.9	19.3	3.6
	Mokpo	66.2	56.8	9.4	35.4	23.2	12.2	36.4	30.1	6.3	28.1	24.4	3.7
South Coast	Jeju	70.4	57.3	13.1	64.5	53.4	11.1	50.9**	56.8**	-5.9**	45.0	41.7	3.3
	Yeosu	164.8**	157.0**	7.8**	91.8**	57.3**	34.5**	117.4	103.2	14.2	119.0	97.4	21.6
	Busan	54.7	53.5	1.2	79.0	49.6	29.4	92.9	87.7	5.2	70.0	50.2	19.8
East Coast	Ulsan	33.3	33.3	0.0	103.9	80.3	23.6	103.5	101.4	2.1	***	***	***
	Mukho	41.1	41.6	-0.5	62.2	47.4	14.8	39.6	37.3	2.3	45.3	42.3	3.0
	Sokcho	38.2	39.2	-1.0	51.2	37.2	14.0	14.9	13.9	1.0	***	***	***

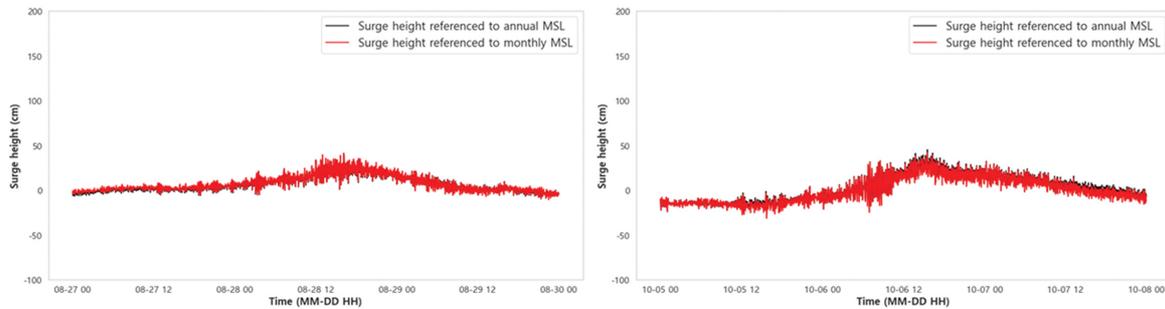
* A: Max surge height considering annual MSL, M: Max surge height considering monthly MSL, D: Differences of annual and monthly MSL
 ** Recorded max surge height before malfunction due to typhoon impacts
 *** Missing observation



(a) Incheon



(b) Busan



(c) Mukho

BOLAVEN(TY1215)

KONG-REY(TY1825)

Fig. 4. Time series of storm surge at selected tidal stations induced by typhoon BOLAVEN(TY1215) and KONG-REY(TY1825) with reference to annual and monthly MSL.

향으로, 서해안 지점들은 수온 및 해면 기압의 영향으로 모든 해역에서 하계 해수면이 연평균 해수면에 비해 높게 나타나는 것으로 분석되었다.

3.4 평균 해수면 기준에 따른 최대해일고 비교

국립해양조사원의 특이 해양현상 분석 보고서에서 제시하고 있는 SH_a와 본 연구에서 접근한 하계의 상승된 해수면을 기준으로 산정한 최대해일고 SH_m를 비교하였다. SH_a와 SH_m는 Table 6에 제시되는 것과 같다.

비교 결과를 살펴보면 연평균 해수면 대비 월평균 해수면 상승 폭이 큰 9월에 발생한 태풍 SANBA(TY1216)의 경우 태풍의 영향권에 포함되지 않은 지점에서도 SH_a와 SH_m의 차이가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 태풍 SANBA(TY1216)의 직접적인 영향을 받은 남해안의 여수, 부산 및 동해안 지점들은 SH_a와 SH_m의 차이가 14.0~34.5 cm로 상당히 크게 나타났다. 태풍 영향권에 속하지 않은 서해안의 인천, 군산, 목포의 경우도 8.3~12.2 cm로 차이를 보인다. 반면에 연평균 해수면 대비 월평균 해수면 상승 폭이 상대적으로 작은 10월에 발생한 태풍 KONG-REY(TY1825) 내습 시 영향권에 있던 지점인 여수, 부산을 제외하고 모든 지점에서 약 3.0 cm의 다소 작은 차이를 보였다. 이는 10월의 해수면과 연평균 해수면이 거의 유사하여, SH_a와 SH_m의 차이도 비슷하게 나타나는 것으로 판단된다.

연평균 대비 하계 평균 해수면 상승 폭이 큰 서해안 지점들은 태풍의 영향권에 속할 경우는 물론이고, 영향권에 속하지 않더라도 연평균 해수면 대비 월평균 해수면 상승 폭이 큰 8~9월의 태풍 발생 시 SH_a와 SH_m의 차이가 크게 나타났다. 반면에, 연평균 및 월평균 해수면의 차이가 적은 10월에 발생한 태풍의 SH_a와 SH_m가 거의 비슷하게 산정되었다. 특히, 동해안 지점들은 태풍 SANBA(TY1216)의 영향을 제외하면 태풍 BOLAVEN(TY1215), CHABA(TY1618), KONG-REY(TY1825) 영향에 따른 SH_a와 SH_m의 차이가 0.0~3.0 cm로 계산되어 그 영향이 미미한 것으로 분석되었다. 동해안의 경우 연평균 대비 하계 해수면 상승 폭이 9.0 cm 내외로 서남해안에 비해 작기 때문에 태풍의 직접적인 영향을 받지 않을 경우 SH_a와 SH_m의 차이도 적은 것으로 판단된다.

해역별로 나타나는 해일고 변동을 살펴보기 위해 우리나라 서해안에 영향을 끼친 태풍 BOLAVEN(TY1215)과 남해안에 영향을 끼친 태풍 KONG-REY(TY1825)로 인해 발생한 인천, 부산, 목포 지점의 해일고 시계열을 Fig. 4에 제시하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 SH_a(Fig. 4의 검은색 선)를 산정하면 태풍 내습했을 당시 SH_m(Fig. 4의 빨간색 선)보다 태풍 전기간에 걸쳐 높게 산정된 결과를 보인다. 해역별 특성에 따라 서남동해안의 인천, 부산, 목포 순으로 SH_a와 SH_m의 차이가 작아지는데, 인천과 부산 지점의 경우 연평균 대비 하계 평균 해수면 상승치가 약 9.0 cm 이상으로 크

기 때문에 SH_a가 SH_m보다 크게 산정된다. Fig. 4의 (c)와 같이 목포 지점의 경우 연평균 대비 하계 평균 해수면 상승치가 서남해안에 비해 상대적으로 작기 때문에 SH_a와 SH_m의 그래프도 거의 일치하는 것으로 보인다. 이처럼 해일고 산정은 분석 기간보다는 분석 시 고려된 해수면 높이의 영향이 더 큰 것으로 확인되었으며 태풍 영향 시 정확한 해일고 산정을 위해서는 월평균 해수면을 고려하는 방법이 타당하다고 판단된다.

4. 토 의

본 연구에서는 하계의 해수면 상승이 폭풍해일고 분석에 미치는 영향을 분석하고, SH_m의 적용 타당성을 검토하였다. 이를 위해 해역별 연평균 해수면 대비 하계 평균 해수면 상승치와 태풍 발생 시 실제 해수면을 고려한 해일고를 재산정하여 그 차이를 살펴보았다. 분석 결과, 하계 평균 해수면은 수온 상승에 따른 열팽창, 역기압 효과에 기인되어 연평균 해수면에 비해 상대적으로 높게 나타난다. 특히, 서해안에서는 반폐쇄인 지형적 특성으로 연평균 해수면 대비 하계 평균 해수면 상승치 차이가 남동해안에 비해 상대적으로 크게 나타나는 것으로 판단된다.

선행연구인 Kim and Suh(2019)의 연구에서도 연평균 해수면 대비 하계 평균 해수면 상승치를 제시한 바 있다. 이들 연구에서는 서해안의 인천, 군산, 목포 3개의 지점에서 각각 21.8 cm, 21.4 cm, 20.7 cm으로 분석하였다. 본 연구에서 인천, 군산, 목포 지점의 연평균 해수면 대비 하계 평균 해수면 상승치가 각각 15.5 cm, 14.7 cm, 14.6 cm로, 이들 기존 연구에서 산정된 결과와 비교하였을 때 각각 6.3 cm, 6.7 cm, 6.1 cm로 다소 차이가 있다. 이러한 차이가 유발된 이유로 선행연구에서는 1959~2017년 기간을 대상으로 하계 기간 중 가장 높게 나타나는 한 달간의 평균 해수면을 산정하여 해석한 반면, 본 연구에서는 1960~2020년 기간 동안 전반적으로 해수면이 상승하는 7~10월의 하계에 대한 평균을 분석한 차이에 기인한다. 분석 기간에 따라 달라지지만, 우리나라 하계 해수면 상승 연구(Kang et al., 2008b; Kim and Suh, 2019) 결과 및 본 연구에서 수행한 바와 같이 하계 수온 상승 및 역기압 효과에 의해 하계 평균 해수면이 타계절 혹은 연평균에 비해 높아짐을 알 수 있다. 특히, 태풍은 해수면이 높아진 하계에 주로 발생하기 때문에, 실제 폭풍해일고도 하계에 상승된 해수면을 기준으로 태풍 이동에 따른 저기압과 해수면에 작용하는 바람응력 등의 영향에 따라 변동되어 상승 또는 하강하는 잔차로 정의하여 산정해야 한다.

기존 국내 폭풍해일 관련 보고서(KIOST, 2010)에서는 연평균 해수면을 기준으로 기상 외력조건을 고려하고, 조석 조건을 부여하여 폭풍해일고를 산정하고 있으며, 이와 같은 결과를 토대로 연안 구조물 또는 항만 시설 설계 등에 적용하고 있다. 그러나, 본 연구를 통해 살펴본 바와 같이 SH_a는

실제 하계에 상승된 SH_m보다 상대적으로 크게 추산되기 때문에 설계 빈도 개념을 도입한 각종 해안 구조물의 마루높이 추산 시 과대 산정될 우려가 있을 수 있다. 이는 실제 폭풍해일고 개념과 연평균 해수면으로부터 추산한 태풍 사상 시 나타나는 해일고 중 최대치를 고려하는 극치해면고와 혼동에 기인한 것으로 이해할 수 있다.

10월에 발생된 폭풍해일고는 SH_a와 SH_m의 값이 유사하게 나타났다. 반면, 연평균 대비 해수면 상승 폭이 가장 높게 나타나는 8, 9월달에 발생된 태풍에 기인한 해일고는 SH_a와 SH_m의 차이가 크며, SH_a가 과대 산정됨이 확연히 나타났다. 본 연구를 통해 우리나라 해안에 영향을 미치는 태풍 발생 시기가 해일고 산정에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, 태풍 영향 시 정확한 해일고 산정을 위해서는 월평균 해수면을 고려하여 SH_m를 산정하는 것이 타당한 분석 방법이라고 판단된다.

본 연구를 진행하면서 도출된 제한사항은 국립해양조사원의 특이 해양현상 분석 보고서에 태풍의 직접 영향권에 속한 지점만을 대상으로 폭풍해일고를 산정하고 있어 간접 영향권에 있는 지점에 대해 객관적인 비교가 어렵다는 점이다. 이 문제점을 보완하기 위해 본 연구에서는 특이 해양현상 분석 보고서에서 추산한 동일 방법으로 SH_a를 산정하였다. 그러나 분석 과정에 불가피하게 존재하는 결측치가 있는 경우 적정 보완 방법 적용, 분석 기간 설정 및 조석 보정 유무 등 여러 변수로 인해 해일고 추산에 다소 차이가 발생할 수 있다. 이와 같은 제한사항은 추후의 연구에서 해소될 수 있을 것으로 기대한다.

5. 결 론

본 연구에서는 하계 해수면 상승이 폭풍해일고 분석에 미치는 영향을 분석하고, 월평균 해수면을 고려한 폭풍해일고 산정 방법의 타당성을 제시하였다. 이를 위해 연평균 해수면 대비 하계 평균 해수면 상승치와 그 차이를 살펴보고, 해수면과 해일고의 관계를 분석하였다.

하계의 월평균 해수면은 수온 상승 및 역기압 효과로 연평균 해수면보다 상승하게 되며, 연평균 해수면 대비 하계 월평균 해수면 상승 폭은 서해안, 남해안, 동해안 순으로 크게 나타난다. 이러한 영향으로 모든 지점에서 SH_a와 SH_m의 차이가 발생한다. 연평균 대비 월평균 해수면이 높아지는 8-9월달에 SH_a와 SH_m의 차이가 분명하게 나타났으며, 연평균과 월평균 해수면 높이가 비슷한 10월에는 SH_a와 SH_m의 차이가 다소 작게 나타났다.

본 연구의 분석에 따르면, 태풍은 대부분 해수면이 가장 높은 하계에 발생하기 때문에 연평균 해수면을 기준으로 예측 조위를 산정하게 되면 월평균 해수면을 고려한 예측 조위보다 낮게 나타나 SH_a는 SH_m에 비해 높게 산정된다. 현재 해안 구조물의 설계 시 설계조위는 조위관측소에서 제공하는

1년 이상 장기관측자료 기반으로 추산됨이 일반적이다. 이는 연평균 해수면을 기준으로 산정되기 때문에 본 연구와 같이 하계 평균 해수면을 기준으로 추산할 경우, 국내 연안 구조물의 설계조위가 대부분 낮게 추산될 가능성이 높다. 즉, 현재까지 일반적으로 추산된 해안 구조물의 설계조위가 과대 산정된 것으로 판단되며, 설계조위 추산 시 필요한 폭풍해일고의 재산정이 필요할 것으로 보인다. 따라서 폭풍해일고의 정확한 산정을 위해서는 실제 태풍이 발생하고 영향을 미친 해당 SH_m에 각 해역별 여름철 상승된 해면고를 고려하는 방법이 적절할 것으로 판단된다.

향후 연구에서는 기존 관측자료에 불가피하게 존재하는 결측치와 자료 이상 등의 문제점을 해결하기 위해 결측치 보완의 적절한 방법 도입이 필요할 것으로 보인다. 또한, 각 해안별 특성이 고려된 장기간의 연평균 해수면 상승 추이와 함께 태풍이 주로 영향을 미치는 빈도가 도입된 여름철 특성을 고려하여 해당 월의 SH_m 재산정이 요망되며, 월평균 해수면 값이 태풍 등 기상에 의한 해일이 포함된 해수면 높이이므로, 해일의 성분이 제거된 월별 해수면 높이를 산정할 필요성이 있다. 이와 같은 재분석된 해일고를 토대로 기존 연평균 해수면을 기준으로 설계된 연안 시설물 마루높이 등의 재평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구이며(연안활동장소에 대한 위험도 평가 및 예측체계 개발), 또한 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R111A3071573).

References

- Bell, C., Vassie, J.M. and Woodworth, P.L. (2000). POL/PSMSL tidal analysis software kit 2000 (TASK-2000), permanent service for mean sea level. CCMS Proudman Oceanographic Laboratory, UK, 22 p.
- Birnbaum, A. (1961). A unified theory of estimation, I. The annals of mathematica-l statistics, 112-135.
- Cha, J. and Kim, J. (2018). Analysis of fine dust correlation between air quality and meteorological factors using SPSS. Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, 22(5), 722-727 (in Korean).
- Emanuel, K., Sundararajan, R. and Williams, J. (2008). Hurricanes and global warming: Results from downscaling IPCC AR4 simulations. Bulletin of the American Meteorological Society, 89(3), 347-368.
- Hyun, S.K., Kim, S.E., Jin, J.Y. and Do, J.D. (2016). Numerical simulation of water level change at the coastal Area in the east sea with the inverted barometer effect. Journal of Korean Soci-

- ety of Coastal and Ocean Engineers, 28(1), 13-26 (in Korean).
- IPCC (2014). Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, I and II to the fifth assessment report of the intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- Jung, T.S. (2014). Change of mean sea level due to coastal development and climate change in the western coast of Korean peninsula. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 26(3), 120-130 (in Korean).
- Kang, J.H., Kim, Y.S. and Cho, H.Y. (2013). 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 Engineers*, 25(3), 165-171 (in Korean).
- Kang, J.H., Park, S.J. and Park, M.W. (2008a). Rising tendencies of both tidal elevation and surge level at the southwestern coast. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 20(1), 14-24 (in Korean).
- Kang, S.K., Cherniawsky, J.Y., Foreman, M.G., So, J.K. and Lee, S.R. (2008b). Spatial variability in annual sea level variations around the Korean peninsula. *Geophysical Research Letters*, 35(3).
- Kang, T.S., Oh, H.M., Lee, H.M. and Eum, H.S. (2015). Storm surge vulnerability assessment due to typhoon attack on coastal area in Korea. *Journal of the Korean Society of Marine Environment Safety*, 21(5), 608-616 (in Korean).
- Kang, Y.Q. and Lee, B.D. (1985). On the annual variation of mean sea level along the coast of Korea. *The Journal of the Oceanological Society Korea*, 20, 22-30 (in Korean).
- Kim, H.J. and Suh, S.W. (2019). Summer seasonal sea-level rise and associated potential storm surge vulnerability of the West Coast of Korea. *Journal of Coastal Research*, 91(SI), 21-25.
- Kim, Y.I., Kim, D.H. and Lee, S.O. (2020). Prediction of temperature and heat wave occurrence for summer season using machine learning. *Journal of Korean Society of Disaster and Security*, 13(2), 27-38 (in Korean).
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (2012a). Oceanic abnormal phenomena report Vol. 2 (in Korean).
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (2012b). Oceanic abnormal phenomena report Vol. 3 (in Korean).
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (2016). Typhoon report, Vol. 1 (in Korean).
- Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (2018). Typhoon report, Vol. 3 (in Korean).
- Korea Institute of Ocean Science & Technology (2010). Development of storm surge and tsunami prediction system and estimation of design water level for major ports in Korea research report (in Korean).
- Korea Meteorological Administration Weather Nuri (2021). Korea's Typhoon Occurrence. <https://www.weather.go.kr/w/typhoon/typ-stat.do> (last date accessed: 15 June 2021) (in Korean).
- Ku, H.Y., Maeng, J.H. and Jo, K.W. (2019). Deterministic estimation of typhoon-Induced surges and inundation on Korean coastal regions. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(1), 1-8 (in Korean).
- Marcos, M., Tsimplis, M.N. and Calafat, F.M. (2012). Inter-annual and decadal sea level variations in the north-western Pacific marginal seas. *Progress in Oceanography*, 105, 4-21.
- Menéndez, M. and Woodworth, P.L. (2010). Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge data set. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C10).
- Ministry of Oceans and Fisheries (2021). Coastal Disaster Damage Status (2021). <https://coast.mof.go.kr/coastAdmin/research/disaster.do> [accessed 2021.06.0-4.] (in Korean).
- Park, S.H. (2018). Adaptive sea level prediction method based on harmonic analysis. *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 22(2), 276-283 (in Korean).
- Pugh, D.T. (1987). Tides, surges and mean sea-level. John Wiley and Sons, 472 pp.
- Suh, S.W. and Kim, H.J. (2018). Simulation of wave overtopping and inundation over a dike caused by typhoon CHABA at marine city, Busan, Korea. *Journal of Coastal Research*, 85, 711-715.
- Watson, P.J. (2015). Development of a unique synthetic data set to improve sea-level research and understanding. *Journal of Coastal Research*, 31(3), 758-770.
- Wikipedia (2021). <https://ko.wikipedia.org/wiki/Typhoon> (last date accessed: 30 August 2021).
- Yoon, J.J. and Kim, S.I. (2012). Analysis of long period sea level variation on tidal station around the Korea peninsula. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 12(3), 299-305 (in Korean).

Received 7 December, 2021

Revised 17 December, 2021

Accepted 20 December, 2021