비정상성 GEV 분포모형을 적용한 폭풍해일고 산출

Calculation of Storm Surge by Non-stationary GEV Distribution Model

정병순* · 강태웅** · 안준용***

Jung, Byungsoon*, Kang, Taewoong**, and Ahn, Junyong***

Abstract

In Republic of Korea, stationary extreme value distribution models are generally used for estimating the design of coastal and harbor structures. However, due to the impact of climate change, the probability of typhoon is recently increasing. In order to consider this tendency, a non-stationary extreme value distribution model was applied in this study. The annual maximum storm surges were calculated by the storm surge model, and then, results from the storm surge model were applied to a non-stationary GEV (Generalized Extreme Value) distribution model to calculate the extreme storm surge height. The storm surge height of 50 year return period by non-stationary model was 28% higher than the storm surge height of a previous study that used stationary models. The overall results achieved in this study are expected to provide data and useful in establishing a master plan for disaster prevention.

Key words : Non-Stationary, GEV Model, Maximum Likelihood Method, Storm Surge

요 지

국내에서는 연안 및 항만구조물 설계에 적용하는 폭풍해일고 산출에 정상성 극치확률분포모형을 일반적으로 적용하고 있다. 그러나 최근들어 기후변화의 영향으로 태풍강도가 증가한 태풍 내습 확률이 증가하고 있는 실정이다. 이러한 경향을 고려하기 위하여 본 연구에서는 비정상성 극치분포모형을 적용하였다. 폭풍해일 실험결과로 연별 최대해일고를 산출하고 비정상성 GEV (Generalized Extreme Value) 분포모형을 적용하여 재현빈도 폭풍해일고를 산출하였다. 기존 연구결과와 비교한 정상성 해일고를 기준으로 비정상성 50년빈도 폭풍해일고는 28% 증가하였다. 본 연구에서 제시하는 비정상성 폭풍해일고는 재해예방 및 대응·대비 대책 수립을 위한 자료로 활용될 수 있다고 판단된다.

핵심용어 : 비정상성, GEV 모형, 최우도법(MLM), 폭풍해일고

1. 서 론

2016년에 발생한 제18호 태풍 차바(중심최저기압 905 hPa, 10분최대풍속 60 m/s)는 우리나라 남동해안을 강타하면서 6명의 사망과 재산피해 2,150억원(사유·공유시설)을 입힌 바 있으며, 2016년 14호 태풍 트란트(중심최저기압 890 hPa, 10분최대풍속 60 m/s)는 대만과 중국에서 사망 44명의 피해

를 입혔다. 그리고 2017년에는 제8호 허리케인 하비(중심최저기압 938 hPa, 1분 최대풍속 60 m/s)와 제9호 허리케인 어마(중심최저기압 914 hPa, 1분 최대풍속 80 m/s)가 카리브 해 및 미국 남동부 해안을 강타한 바 있다. 이와 같이 기후변화로 인하여 위력이 강한 태풍의 내습이 최근 들어 빈번해지고 있는 추세이다.

태풍은 초기 발생시기부터 에너지공급원인 북태평양의

*교신저자, 정회원, (주)해강기술 연안항만부장(Tel: +82-31-426-8220, Fax: +82-31-8069-8228, E-mail: bsjung@kookmin.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Ph.D, Direct & CTO, Sea&River Technology

** (주)해강기술 사원

Staff, Sea&River Technology

*** 플로리다공과대학교 조교수

Assistant Prof., Department of Civil Engineering and Construction Management, Florida Institute of Technology

해양-대기의 상관관계, 태풍 이동경로 상의 해양-대기 변화에 의한 불확실성, 육지와 바다의 접촉 및 통과시의 변화 등 다양한 변수들의 복잡한 현상을 해석하여야 하므로 태풍 모델링에 한계가 있다. 그리고 이에 동반되는 폭풍해일 역시 태풍 예측의 영향을 받는다고 할 수 있다. 연안 및 항만시설물 설계에서는 이를 해결하기 위한 방법 중의 하나로 재현빈도 폭풍해일고(이하 해일고)를 대부분 사용하고 있다. 재현빈도 해일고는 과거에 내습한 태풍을 대상으로 해일고를 산출하고 이 값들에 대하여 정상성 극치분석을 수행한 결과이다. 정상성 극치분석은 현재의 해일고 경향이 미래에도 유사할 것이라는 가정이 내포되어 있다고 볼 수 있다. 기후변화에 의하여 위력이 강한 태풍들의 내습이 빈번해지고 있는 현상 상황을 감안하여 본 연구에서는 시간이 변함에 따라 해일고가 변하여 확률분포모형의 특성을 나타내는 모수가 시간에 따라 변한다고 정하고 비정상성 GEV (generalized extreme value) 분포모형을 적용하여 비정상성 재현빈도 해일고를 산출하였다. 그리고 정상성 극치분석 결과와 비교하여 해일고 변화를 파악하였다.

2. 폭풍해일고 및 정상성 극치분석

2.1 폭풍해일고 산출

연안 및 항만 시설물의 설계 과정 중 해일고를 산출하는 사례는 많지만, 우리나라 전체 해안을 대상으로 재현빈도 해일고를 산출한 사례는 국토해양부(MLTMA, 2010), 국립해양조사원(KHOA, 2010~2016)이 유일하다고 할 수 있다. 국토해양부(MLTMA, 2010)는 우리나라 해안에 대하여 약 2 km 간격으로 50년빈도 해일고를 제시한 바 있다. 국립해양조사원(KHOA, 2010~2016)은 서해안과 남해안(제주도 포함)을 최소격자 10~20 m로 구성하여 재현빈도별 해일고를 산정하고 해안침수예상도를 제작·수정하고 있다.

본 연구에서는 전체 해안을 대상으로 정상성과 비정상성 극치분석을 수행하기 위하여 해일고 산출을 수행하였다. 해일고 산출은 태풍해상풍 모형인 TPM (typhoon parameter model) 모형으로 기압장과 바람장을 산출한 후 해일모형인 SURGE (storm surge) 모형으로 해일고를 산출하였다. 먼저 TPM 모형은 대기경계층 내에서의 물리적인 과정을 포함한 원시운동방정식을 이용하였으며 Rankin vortex model에 해당한다(Bretschneider and Lo, 1984).

$$(P(r) - P_0) / (P_\infty - P_0) = A e^{-B \frac{r_0}{r}} \quad (1)$$

여기서 $P(r)$ 은 태풍 중심으로부터 거리 r 인 지점의 해면 기압, P_0 는 중심해면기압, P_∞ 는 태풍 영향권 밖에서의 해면 기압, r_0 는 중심으로부터 최대풍속이 발생하는 지점까지의 거리(최대풍반경), A , B 는 각각 경험계수이다. 최대풍반경

은 Liang and Chien (1984) 방법을 적용하였다. 다음으로 SURGE 모형의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} (H \bar{U}) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (H \bar{V} \cos \phi) \right] = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \frac{g}{R \cos \phi} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} = f \bar{V} - \frac{1}{\rho R \cos \phi} \frac{\partial P}{\partial \lambda} - \frac{\tau_{b\lambda} - \tau_{s\lambda}}{\rho H} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \frac{g}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \phi} = -f \bar{U} - \frac{1}{\rho R} \frac{\partial P}{\partial \phi} - \frac{\tau_{b\phi} - \tau_{s\phi}}{\rho H} \quad (4)$$

여기서 ϕ , λ , t 는 위도, 경도, 시간이며, η 는 해수면 상승 높이, $\bar{U}$, $\bar{V}$ 는 수심평균 속도, R 은 지구 반지름, H 는 총 수심, ρ 는 해수밀도, g 는 중력가속도, P 는 압력, f 는 코리올리 계수, τ_s , τ_b 는 바람과 해저면의 마찰응력이다. SURGE 모형의 지배방정식은 이송, 확산과 같은 유체흐름의 복잡한 물리현상을 각각 독립적인 과정의 합으로 나타낼 수 있는 시간분할법을 적용하였으며, 전파항은 각 방향에 대하여 3대각행렬을 형성하도록 ADI 음해법으로 유한차분하였으며, 교호격자체계를 사용하였다. 초기조건은 전 계산영역에 대하여 해수위와 유속을 모두 영으로 설정하는 cold start 기법을 적용하였으며, 경계조건 중 육지경계에서는 유속을 0으로 하는 완전치수조건을 적용하였다. 하천경계는 하천유량으로부터 수심 적분된 유속을 계산하여 적용하였고, 외해경계에서는 시간에 따른 수위변화를 경계조건으로 부여할 수 있도록 구성하였다. 태풍 해상풍 모형과 폭풍해일 모형에 대하여서는 Jung et al. (2017), Kang et al. (2009), KORDI (2000)에 자세히 기술되어 있다. 수심 및 해안선은 국립해양조사원의 237개 해도, KorBathy30s (Seo, 2008), 항만 및 어항 측량성과를 적용하였으며, 북태평양 수심은 JODC (Japan Oceanographic Data Center), ETOPO1 (NOAA)을 사용하였다. 적용 태풍은 1951년부터 2016년까지 한반도 해역에 내습한 234개 태풍을 대상으로 하였다(Fig. 1).

Fig. 1. Typhoon Track of 1951~2016

폭풍해일 실험은 태풍 영향을 고려하기 위하여 우리나라 영향권 밖에서부터 수행하여야 하며, 연안에서는 지형 영향을 고려하기 위하여 상세한 격자로 설정하여야 한다. 이 2가지 조건을 만족하는 방법에는 격자삽입법과 비구조적 격자설정법을 들 수 있으며, 본 연구에서는 격자삽입법을 적용하여 5단계 격자체계로 구성하였다. 폭풍해일 실험 시 중간역1까지는 우리나라 전체 해안이 동일한 격자를 사용하며, 중간역2 부터는 실험대상 연안에 따라 해당 격자망의 실험이 수행되는 형태의 알고리즘으로 실험하였다. 이 방법의 단점은 계산시간과 저장용량이 많이 필요하지만, 전체 해안을 동일한 간격으로 산출할 수 있는 장점이 있다(Table 1).

폭풍해일 실험 검증은 이어도 검조소를 제외한 50개 검조

소의 관측값과 비교하였다. 비교는 극치분석에 영향이 큰 최대해일고 순위 1~10위에 대하여 검증한 후 전체 태풍에 대한 결과를 도출하였으며, 일부 검조소는 관측기간이 짧기 때문에 상위값 일부를 검증하였다. 검증방법은 태풍 내습시의 관측자료 조화분석에 의한 관측최대해일고와 실험결과와의 최대해일고를 비교하였다. 검조소별·태풍별 전체 282개에 대하여 검토하였으며, 관측해일고 대비 실험해일고 비는 114.7%로 실험값이 높은 것으로 분석되었다. 이는 실제 태풍과 실험 태풍의 형상, 해상의 바람자료 부족, 해상 및 육지면 마찰계수의 차이 등에 의한 영향 때문으로 판단된다. Fig. 2는 태안, 여수, 부산, 묵호 검조소의 관측극조위, 관측조위를 조화분석한 평균해면과 연최대기상조 및 폭풍해일

Table 1. Grid Systems of Storm Surge Model (Example: Busan Saha-gu)

Devision	Area Range	Cell Size	Time Interval	Number of Areas
Large Area	117~143°E, 20~50°N	1/6° × 1/6° (approx. 20km)	3,600s	1
Midde Area1	125~131°E, 32~38°N	1/30° × 1/30° (approx. 4km)	600s	1
Midde Area2	128.1303~129.4404°E, 34.3382~35.4226°N	approx. 800m × 800m	300s	7
Midde Area3	128.7724~129.4318°E, 34.8750~35.4189°N	approx. 200m × 200m	120s	15
Detail Area	129.0132~129.1186°E, 35.0465~35.1365°N	20m × 20m	15s	357

(a) Taaan

(b) Yeosu

(c) Busan

(d) Mukho

Fig. 2. Time Series of Calculated Storm Surge and Observed Tide at Tidal Gauging Station

실험결과와 연최대해일고를 제시한 것이다. Fig. 2에서 관측 극조위, 평균해면, 연최대기상조는 결측 및 이상자료를 제외하고 제시한 것이다. 평균해면은 지속적으로 증가하고 있는데 Fig. 2에서 관측기간이 짧은 대안 검조소를 제외하고 평균해면 변화에 해당하는 cross+실선을 분석하면, 여수 검조소의 평균해면 증가율(1987~2016년)은 1.3 mm/yr, 부산 검조소의 평균해면 증가율(1987~2016년)은 1.5 mm/yr, 목호 검조소의 평균해면 증가율(1987~2016년)은 2.8 mm/yr 등 각 조위 검조소의 평균해면 증가율은 (+)이다. 그리고 Fig. 2에서 관측극조위의 극값 출현율 역시 높아지고 있음을 알 수 있다. Table 2에 제시한 검조소 대상으로 0.5 m 이상의 연최대해일고에 대하여 1985년 이전(1951~1984년, 34년) 대비 1985년 이후(1985~2016년, 32년) 출현율은 서해안(영흥도~목포) 19% 감소, 남해안(완도~부산) 71% 증가, 제주도(제주, 서귀포) 150% 증가이다. 동해안은 1985년 이전에는 0.5 m 이상의 연최대해일고가 발생하지 않았지만 1985년 이후에는 평균 2회 발생한 것으로 산출되었다. 1.0 m 이상 연최대해일고의 1985년 이전 대비 1985년 이후 출현율은 서해안 8%, 남해안 97% 증가하는 것으로 분석되었다. 제주도와 동해안은 1.0 m 이상의 연최대해일고가 산출되지 않았다. 이 결과는 과거에 비하여 1985년 이후 태풍강도가 강한 대형 태풍의 내습이 증가한 것을 의미하며, 특히 제주, 남해안을 통과하는 태풍의 강도 증가가 높았다는 것을 의미한다.

2.2 정상성 극치분석

von Mises (1954)와 Jenkinson (1955)이 제시한 GEV 분포 모형은 다음 식과 같다.

$$P(X \leq x) = e^{-\left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi}}} \quad (5)$$

여기서 ξ 는 형상모수, μ 는 위치모수, σ 는 규모모수이다. 모수값을 산정(추정)하는 방법에는 다양한 방법이 있으며, 본 연구에서는 최소자승법, 확률가중적률법, 통상모멘트법을 적용하였다. 통계분석 결과의 적합도 검정방법은 크게 도시적 검정방법과 통계적 검정방법으로 구분할 수 있다. 도시적 검정방법에는 확률지 검정, Q-Q (quantile-quantile) plot, P-P (probability-probability) plot 등이 있으며, 통계적 검정방법에는 K-S (Kolmogorov-Smirnov) 검정, Anderson-Darling 검정 등이 있다. 본 연구에서는 일반적으로 분포형에 대한 적합도 검정에 사용되는 K-S 검정, Q-Q plot, P-P plot를 적용하였다.

정상성 극치분석의 통상모멘트법 결과는 5개 검조소에서 K-S 검정 등을 통과하지 못하여 제외하였다. 최소자승법 결과의 P_{val} (K-S 검정의 유의확률)은 0.232~0.996(평균 0.751)이고, 검정통계량(표본자료의 누가분포함수와 이론적인 누가분포함수의 차)은 0.050~0.128(평균 0.081)이다. 확률가중

적률법 결과의 P_{val} 은 0.101~0.996(평균 0.595)이고, 검정통계량은 0.051~0.150(평균 0.096)이다. K-S 검정결과에 따라 우리나라 전체 해안 대비 P_{val} 값이 높고 검정통계량이 낮은 최소자승법으로 극치분석을 수행하였다.

3. 비정상성 극치분석

비정상성이란 시공간이 변함에 따라 자료의 기초 통계량인 평균과 분산이 변화하고 시계열 자료가 경향성, 도약성, 주기성을 가지게 되는 것을 의미한다. 이러한 시계열 자료를 극치분석하기 위하여 비정상성 극치분포모형을 수립·적용하고 있는데 일반적으로 정상성 극치분포모형의 모수에 시간변수를 적용하는 방법을 사용하고 있다. 정상성 극치분포모형은 Gumbel, GEV, Weibull 등 여러 모형이 있으며, 본 연구에서는 수학적 이론 배경을 가지면서 Gumbel, Fréchet, Weibull 모형을 포함하고 있는 GEV 분포모형을 적용하였다. 그리고 다양한 모수추정법 중 비정상성 GEV 분포모형에 적용한 최우도법(MLM, Maximum Likelihood Method)은 비정상적인 시계열 자료를 극치분석하기에 적합한 방법이며, 다양한 분야에서 입증된 바 있다(Cheng et al., 2014; Izaguirre et al., 2011; Menéndez et al., 2009; Mudersbach and Jensen, 2010; Russo et al., 2014; Sartini et al., 2015; Serafin and Ruggiero, 2014). 본 연구에서는 GEV 분포모형의 모수 3가지 중 위치모수를 대상으로 일정한 상수가 아닌 β_0 (시간불변의 위치모수)와 β_1 (시간종속 위치모수)로 구분한 다음의 식을 적용하였다(Sung et al., 2012; Kharin and Zwiers, 2005).

$$\mu(t) = \beta_0 + \beta_1(t) \quad (6)$$

Eq. (6)을 Eq. (5)에 대입하면 Eq. (7)과 같은 비정상성을 고려한 GEV 분포모형을 구할 수 있다.

$$P(X \leq x) = e^{-e^{\left(\frac{x - \beta_0 - \beta_1 t}{\sigma}\right)}} \quad (\xi = 0) \quad (7)$$

정상성 GEV 분포모형의 우도함수는 Eq. (8)과 같다. 최우도법은 Eq. (8)의 모수를 각각 미분해서 그 값이 0에 수렴하도록 하는 방법으로 식을 푸는 과정이 복잡해서 Newton-Raphson 법을 적용해서 계산한다. 비정상성 GEV 분포모형에서는 Eq. (8)의 μ 대신에 $\beta_0 + \beta_1$ 를 대입하고 Newton-Raphson 법과 Matrix 해석을 이용해서 변수들을 적용하였다.

$$\ln [L(\mu, \sigma, \xi)] = -N \log \sigma - \left(1 - \frac{1}{\xi}\right) \sum_{i=1}^N \log \left[1 - \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right] - \sum_{i=1}^N \left[1 - \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{\frac{1}{\xi}} \quad (8)$$

연최대해일고를 적용한 비정상성 GEV 분포모형의 모수 값을 정리하였다(Table 2). 시간과 관련 있는 β_1 값이 태풍의 길목에 해당하는 제주 지역(제주, 서귀포, 추자도, 거문도)과 서남해 지역(위도, 목포, 완도, 흑산도)에서 (+) 값으로 도출되었다. 그 외 지역은 (-) 값으로 연최대해일고의 연별 증가가 거의 없는 것으로 분석되었다. 이 결과는 대형 태풍에 의한 최대해일고 발생빈도는 과거에 비하여 높아졌지만 대형 태풍이 내습하지 않은 해에는 낮은 해일고가 발생한 영향 때문으로 판단된다.

극치분석 결과를 검토하기 위하여 도시적 검정방법인 P-P plot (검정분포값의 누적비율에 대한 변수의 누적비율의 그래프)과 Q-Q plot (해일고 검정분포값의 분위수에 대한 변수의 분포분위수 그래프)을 수행하였다. Fig. 3에서 원으로 표시된 것은 검조소 자료의 누적비율 또는 분위수(x 축)와 이에 대응하는 이론 확률분포의 누적비율 또는 분위수(y 축)를 표시한 것이며, 실선은 $y = x$ 로 일치하는 경우에는 자료가 정규분포 형태를 따른다고 판단할 수 있다. 6개 검조소의 P-P plot은 정규분포 형태를 취한다고 볼 수 있지만, 영흥도, 여수, 부산의 Q-Q plot에서 $y = x$ 선보다 가파른 것으로 나타났다. 이는 분포함수의 상위분위가 크다는 것을 의미하는 것으로 주로 2000년 이후 내습한 대형 태풍(2000년 프라피룬, 2002년 루사, 2003년 매미, 2012년 산바, 볼라벤)의 영향 때문이다.

50년빈도 해일고에 대하여 정상성 GEV 분포모형과 국토해양부(2010)의 결과를 비교하였다(Table 3). 정상성 대비

국토해양부(2010)의 해일고 차이는 평균 3 cm (-13 cm ~ 23 cm)로 해상풍 모형, 해일 모형, 격자해상도, 극치분포모형 등의 차이를 감안하면 유사하다고 판단된다. 비정상성 GEV 분포모형 결과는 목포부터 부산지역에서 정상성 대비 증가 폭이 두드러지게 나타났다. 이는 2000년 이후에 발생한 대형 태풍의 영향이 반영된 것이며, 목포는 검조소의 지형적인 특징이 포함된 것으로 판단된다. 50년빈도 해일고에 대한 정상성 대비 비정상성의 증가율은 서해안 45% (목포 제외시 26%), 남해안 46%, 동해안 11%, 제주 7%로 모든 해역에서 증가하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 우리나라 전체 해안을 대상으로 1951~2016년에 내습한 태풍을 적용한 실험해일고에 대하여 정상성 GEV 분포모형의 위치모수에 시간함수를 적용한 비정상성 GEV 분포모형의 적용성에 대하여 검토하였다.

0.5~1.0 m의 해일고를 대상으로 1985년 이전 대비 1985년 이후 출현율은 서해안은 감소하고 남해안과 제주도는 증가하였는데 이는 남해안과 제주를 통과하는 태풍의 위력이 강하였다는 것을 의미하며, 실제 1985년 이후의 해일피해 남해안에서 많이 발생한 바 있다. 비정상성 GEV 분포모형의 시간종속 위치모수 중 (-) 값이 도출된 검조소가 전체의 절반 이상인 56%로 나타났는데 이는 해일고 극값 출현율은 높아졌지만 해당년도 외에는 낮은 해일고가 발생한 영향이

Table 2. Estimation of Non-stationary GEV Parameters

Station Name	β_0 (standard deviation)	β_1 (standard deviation)	σ (standard deviation)	ξ (standard deviation)
Yeongheungdo	22.714 (4.881)	-0.035 (0.113)	18.540 (2.363)	0.338 (0.137)
Taeon	21.515 (4.493)	-0.020 (0.106)	17.887 (2.277)	0.360 (0.131)
Wido	18.267 (3.739)	0.016 (0.091)	16.258 (2.143)	0.432 (0.130)
Mokpo	18.459 (3.959)	0.041 (0.102)	18.879 (2.858)	0.551 (0.170)
Wando	24.997 (5.186)	0.028 (0.131)	23.096 (3.033)	0.301 (0.157)
Yeosu	32.017 (6.991)	-0.004 (0.168)	30.177 (4.261)	0.290 (0.190)
Tongyeong	20.666 (3.574)	-0.015 (0.082)	17.905 (2.448)	0.482 (0.133)
Busanewport	18.683 (3.173)	-0.007 (0.071)	16.307 (2.211)	0.496 (0.125)
Busan	19.068 (3.297)	-0.013 (0.076)	16.212 (2.161)	0.441 (0.132)
Hupo	8.306 (1.090)	-0.027 (0.027)	5.317 (0.701)	0.400 (0.138)
Mukho	6.878 (0.986)	-0.022 (0.022)	4.622 (0.604)	0.406 (0.132)
Sokcho	7.273 (1.122)	-0.031 (0.026)	4.873 (0.607)	0.359 (0.119)
Jeju	15.840 (2.946)	0.054 (0.079)	12.094 (1.293)	0.075 (0.104)
Seogwipo	17.005 (3.104)	0.035 (0.083)	13.047 (1.461)	0.111 (0.118)
Heuksando	28.329 (7.438)	0.071 (0.177)	25.704 (3.215)	-0.203 (0.164)
Chujado	20.084 (4.415)	0.078 (0.123)	17.576 (2.028)	0.021 (0.136)
Geomundo	30.153 (7.705)	0.092 (0.198)	29.538 (4.027)	0.016 (0.195)
Ulleungdo	10.389 (1.600)	-0.021 (0.040)	6.481 (0.699)	0.059 (0.110)

Fig. 3. P-P and Q-Q Plots for Storm Surge at Tidal Gauging Station using Non-stationary GEV

Table 3. Storm Suroge of 50yr Return Period of Stationary and Non-stationary GEV

Station Name	Stationary (a)	MLTMA (2010)	Non-St. (b)	Difference (b)-(a)	Station Name	Stationary (a)	MLTMA (2010)	Non-St. (b)	Difference (b)-(a)
Yeongheungdo	138cm	119cm	169cm	31cm	Hupo	47cm	54cm	55cm	8cm
Taeon	147cm	138cm	172cm	25cm	Mukho	42cm	50cm	48cm	6cm
Wido	135cm	112cm	185cm	50cm	Sokcho	44cm	42cm	45cm	1cm
Mokpo	138cm	121cm	283cm	145cm	Jeju	73cm	70cm	77cm	4cm
Wando	153cm	166cm	200cm	47cm	Seogwipo	79cm	80cm	85cm	6cm
Yeosu	173cm	175cm	250cm	77cm	Heuksando	101cm	87cm	106cm	5cm
Tongyeoong	144cm	141cm	225cm	81cm	Chujado	86cm	90cm	101cm	15cm
Busnanewport	143cm	151cm	213cm	70cm	Geomundo	135cm	124cm	160cm	25cm
Busan	125cm	118cm	186cm	61cm	Ulleungdo	37cm	42cm	38cm	1cm

주요 요인으로 판단된다. 또한, 1차항 시간함수를 적용한 원인도 있을 것으로 판단되며, 2차항 이상의 시간함수를 적용하는 방법에 대한 추가 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 비정상성 50년빈도 해일고는 정상성 대비 28% 증가하였으며 해역별 차이의 원인은 내습 태풍의 강도, 한반도를 지나면서 약해지는 태풍 영향 등에 의한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 우리나라 전체 해안을 대상으로 동일한 조건에서 분석하기 위하여 3개의 모수 중 위치모수를 중점으로 1차항 시간함수를 적용하였다. 하지만 분석결과 동일 해역에서도 검조소별 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 규모모수와 형상모수도 시간 변화가 포함되어 있음을 의미하므로 각 모수에 시간함수를 적용하는 방법에 대하여 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다. 기후변화에 의한 대형 태풍의 지속적인 발생 및 이에 의한 자연재해 위험성이 증가하고 있으므로 시간변동성을 고려한 극치분석이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 신뢰성 있는 재현빈도 해일고 산정에 대한 추가 연구가 지속되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구[MOIS-재난-2015-03]입니다.

References

- Bretschneider, C.L., and Lo, J.M. (1984). A rankin vortex number as a guide to the selection of a model hurricane. *Proceedings of 19th ICCE*, Houston, Texas, pp. 147-161.
- Cheng, L., AghaKouchak, A., Gilleland, E., and Katz, R.W. (2014). Nonstationary extreme value analysis in a changing climate. *Climatic Change*, Vol. 127, No. 2, pp. 353-369.
- Izaguirre, C., Méndez, F.J., Menéndez, M., and Losada, I.J. (2011). Global extreme wave height variability based on satellite data. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 38, L10607, pp. 1-6.
- Jenkinson, A.F. (1955). The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, Vol. 81, No. 348, pp. 158-171.
- Jung, B.S., Bang, K.H., Shin, M.S., Ryu, B.R., and Ko, J.H. (2017). A study of flow changes on the intake basin of power plant by the minus storm surge assumes water level. *Journal of Korean Society of Environmental Technology*, Vol. 17, No. 5, pp. 482-491.
- Kang, S.-W., Jun, K.-C., Park, K.-S., and Han, S.-D. (2009). Storm surge hindcasting of typhoon maemi in masan bay, Korea. *Marine Geodesy*, Vol. 32, No. 2, pp. 218-232.
- Kharin, V.V., and Zwiers, F.W. (2005). Estimating extremes in transient climate change simulations. *Journal of Climate*, Vol. 18, pp. 1156-1173.
- KHOA. (2010-2016). *Mapping and Distribution of Coastal Imundation Maps*. Korea Hydrographic and Oceangraphic Agency.
- KORDI. (2000). *Mitigation engineering development for sea and coastal hazards*. Korea Ocean Research & Development Institute.
- Liang, N.K., and Chien, C.C. (1984). A typhoon wave hindcasting technique. *Proceedings of 19th International Conference on Coastal Engineering*, pp. 561-576.
- Menéndez, M., Méndez, F.J., Izaguirre, C., Luceño, A., and Losada, I.J. (2009). The influence of seasonality on estimating return values of significant wave height. *Coast. Eng.*, Vol. 56, pp. 211-219.
- MLTMA. (2010). *Development of storm surge and tsunami prediction system and estimation of design water level for major ports in Korea*. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
- Mudersbach, C., and Jensen, J. (2010). Nonstationary extreme value analysis of annual maximum water levels for designing coastal structures on the German North Sea coastline. *J. Flood Risk Manag.*, Vol. 3, pp. 52-62.
- Russo, S., Dosio, A., Graversen, R.G., Sillmann, J., Carrao, H., Dunbar, M.B., et al. (2014). Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. *J. Geophys. Res. Atmos.*, Vol. 119, pp. 12500-12512.
- Sartini, L., Cassola, F., and Besio, G. (2015). Extreme waves seasonality analysis: An application in the mediterranean sea. *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 120, pp. 6266-6288.
- Seo, S.N. (2008). Digital 30sec gridded bathymetric data of Korea marginal seas: KorBathy30s. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 20, No. 1, pp. 110-120.
- Serafin, K.A., and Ruggiero, P. (2014). Simulating extreme total water levels using a time-dependent, extreme value approach. *J. Geophys. Res. Oceans*, Vol. 119,

pp. 6305-6329.

- Sung, J.H., Kim, B.S., Kang, H.S., and Cho, C.H. (2012). Non-stationary frequency analysis for extreme precipitation based on representative concentration pathways (RCP) climate change scenarios. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 12, No. 2, pp. 231-244.
- von Mises, R. (1954). La distribution de la plus grande de

n valeurs. *Selected Papers*, Vol. II, Amer. Math. Soc., Providence, R.I. pp. 271-294.

Received	January 12, 2018
-----------------	------------------

Revised	January 16, 2018
----------------	------------------

Accepted	January 29, 2018
-----------------	------------------