

# Frequency analysis of storm surge using Poisson-Generalized Pareto distribution

Kim, Tae-Jeong<sup>a</sup> · Kwon, Hyun-Han<sup>b\*</sup> · Shin, Young-Seok<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Research Fellow, Department of Civil Engineering, Chonbuk National University, Jeonju, Korea <sup>b</sup>Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea <sup>c</sup>Professor, Department of Information & Communication Engineering, Honam University, Gwangju, Korea

Paper number: 18-109 Received: 17 December 2018; Revised: 15 January 2019; Accepted: 15 January 2019

### Abstract

The Korean Peninsula is considered as one of the most typhoon related disaster prone areas. In particular, the potential risk of flooding in coastal areas would be greater when storm surge and heavy rainfall occurred at the same time. In this context, understanding the mechanism of the interactions between them and estimating the risk associated with the concurrent occurrence are of particular interests especially in low-lying coastal areas. In this study, we developed a Poisson-Generalized Pareto (Poisson-GP) distribution based storm surge frequency analysis model to combine the occurrence of the exceedance of a threshold, that is the peaks over threshold (POT), within a Bayesian framework. The storm surge frequency analysis technique developed through this study might contribute to the improvement of disaster prevention technology related to storm surge in the coastal area.

Keywords: Typhoon, Storm surge, Bayesian, Threshold, Disaster prevention

# Poisson-Generalized Pareto 분포를 이용한 폭풍해일 빈도해석

김태정<sup>a</sup> · 권현한<sup>b\*</sup> · 신영석<sup>c</sup>

\*전북대학교 토목공학과 방재연구센터 연구교원 <sup>b</sup>세종대학교 건설환경공학과 교수, '호남대학교 정보통신공학과 교수

### 요 지

한반도는 지형학적 요건으로 인하여 태풍과 관련된 재난이 매년 발생하여 막대한 피해를 유발하고 있다. 태풍 내습시 폭풍해일과 집중호우가 동시 에 발생한다면 해안지역의 침수피해는 더욱 증가할 것으로 사료된다. 이러한 관점에서 태풍과 폭풍해일의 상호의존성을 정량적으로 규명하는 것은 해안지역의 재해분석에 필수적이다. 본 연구에서는 Bayesian 기법을 기반으로 절점기준을 초과하는 임계값의 초과확률을 산정하기 위하여 Poisson 분포와 Generalized-Pareto 분포를 이용한 Poisson-GP 폭풍해일 빈도해석 기법을 개발하였다. 본 연구를 통하여 개발된 Poisson-GP 폭풍해일 빈도해석 기법은 설계해수면의 불확실성을 정량적으로 제시하였으며 해안지역의 폭풍해일 관련 방재기술 향상에 기여할 것으로 판단된다.

핵심용어: 태풍, 폭풍해일, Bayesian, 절점기준, 방재기술

# 1. 서 론

전 세계적 산업화로 인한 지구온난화가 가속화되고 있으며 이로 인하여 기후학적 변동성이 증가되고 있다. 과거에 경험하지 못한 위험기상현상(high impact weather)이 빈번하게

발생하여 기상재해의 규모가 대형화되고 있다(Shi and Cui, 2012; Papagiannaki *et al.*, 2013). 일반적인 기상현상과 다르 게 위험기상현상은 상대적으로 발생빈도는 작지만 일상생활 에 미치는 파급력이 크기 때문에 방재기술관련 연구에서 위험 기상현상 분석은 필수적으로 선행되어야 한다.

수문기상학 분야에 포함되는 대표적인 위험기상현상은 저 기압 특성과 불규칙한 대기상태로 인하여 돌풍과 강수를 동반 하는 태풍이다. 태풍의 발생빈도와 규모는 지난 수십 년 동안

<sup>\*</sup>Corresponding Author. Tel: +82-2-3408-3726

E-mail: hkwon@sejong.ac.kr (H.-H. Kwon)

<sup>© 2019</sup> Korea Water Resources Association. All rights reserved.

꾸준히 증가하고 있으며 특히, 동아시아 지역의 경우 태풍관 련 기상재해가 증가하고 있는 추세이다(Webster *et al.*, 2005; Guo *et al.*, 2009). 우리나라는 중위도에 위치하고 있으며 삼면 이 바다인 지형학적 특성과 국토의 형상이 반도의 형태를 하 고 있어 태풍 내습시 전국이 태풍의 영향권에 포함되며 매년 강한 바람과 호우를 동반한 태풍이 내습하여 일상생활에 밀접 한 영향력을 미치고 있다. 최근 한반도 주변해역은 도시화 및 산업단지 개발이 집중되고 있으며 지구온난화 영향과 맞물려 대형태풍으로 유발되는 해안가 저지대 지역의 침수 및 범람 등과 같은 대규모 재해의 발생 가능성이 급증하고 있다.

수문기상학적으로 폭풍해일(storm surge)이란 열대지방 의 해상에서 발생하는 태풍 및 온대성 저기압 등의 기상학적 요인에 의하여 역기압 효과(inverted barometer effect)로 유 발되는 해수면이 변동하는 현상을 의미한다(Wakelin *et al.*, 2003). 세부적으로는 발달한 저기압이 이동하면서 기압강하 로 연안에서 예보 해수면보다 실제 해수면이 급격하게 상승하 는 현상을 의미한다.

국외의 경우 2005년 미국 남동부를 강타한 대형 허리케인 카트리나는 80% 이상이 해수면보다 저지대인 뉴올리언스 지 역에 막대한 침수피해를 유발하였다. 국내의 경우 우리나라 고흥반도에 상륙하여 서남해안의 큰 해수면 상승을 유발한 태풍은 루사(2002년 15호)이며 동남해안에 최대 해수면 상승 을 유발한 태풍은 매미(2003년 14호)이다. 국내의 경우 기상 관측을 실시한 1904년 이후에 중심부 최저기압이 가장 낮은 태풍으로 기록된 매미로 인하여 인명피해 132명 및 재산피해 4조 7천억여 원을 발생하였으며 전국 14개 지자체가 특별재 해지역으로 선포되었다(Lin *et al.*, 2005). 1997년 사리기간 서해안을 내습한 13호 태풍 위니는 2,027 ha의 침수면적과 220억 원 이상의 재산 피해를 유발한 바 있다.

기후변화와 맞물러 슈퍼태풍과 같은 강력한 태풍의 발생 가능성이 증가하고 있는 시점에서 국외의 경우 폭풍해일 현상 으로 인한 해수면의 경향성 및 변동성을 규명하고자 다양한 해석기법을 개발하고 있다. 우리나라도 슈퍼태풍의 안전지 대가 될 수 없으며 지속적인 태풍 모니터링 및 수문기상학적 해석을 통한 분석시스템 개발이 필요하다(Kim *et al.* 2014). 이러한 배경으로 수문기상학적 변량의 시계열을 활용하여 반 복주기 및 재현빈도를 추정하는 연구가 수행되고 있다(Pugh, 2004; Rego and Li., 2010).

재현빈도에 따른 확률변수를 추정하기 위하여 일반적으로 활용되는 연 최대치 계열(Annual Maximum Series, AMS)은 자료취득과 자료의 독립성 확보측면에서 유리하지만 연 최대 치만을 고려하기 때문에 실질적인 극치사상 분석을 위한 자료 확보의 문제점이 있다. 확률통계학에서는 이러한 문제점을 보완하고자 절점기준을 설정하여 해당 절점기준을 초과하는 부분 시계열(Peaks Over Threshold, POT)을 이용한 연구가 다양한 분야에서 도입되었다(Martins and Stedinger, 2001; Lima *et al.*, 2015).

Lin et al. (2010)은 일반화 파레토(Generalized-Pareto) 분 포를 이용하여 뉴욕지역에 발생한 폭풍해일의 재현기간을 평 가하고 폭풍해일로 인한 피해가능성을 제시하였으며 Lopeman et al. (2015)는 절점기준을 초과한 해수면 자료에 Monte Carlo 모의기법을 적용하여 빈도해석을 수행한 결과 기존에 제시된 설계해수면의 과소추정을 주장하였다. 국내에서도 폭풍해일을 대상으로 다양한 연구가 수행되었으며 Kwon et al. (2008)은 속초와 묵호항 해수면 자료를 이용하여 태풍의 영향으로 인한 해수면 변동성이 밀접한 관계가 있음을 확인하 고 태풍과 연계된 해수면 분석의 필요성을 제언하였다. Suh et al. (2012)는 태풍으로 인한 폭풍해일의 실시간 예보를 목적으 로 Mattocks et al. (2006)이 개발한 ADCIRC 모형과 Fleming et al. (2008)의 개발한 SLOSH 모형을 고성능 병렬컴퓨터와 연계하여 실시간 즉각 예보체계의 신속성과 정확성을 검토하 였다. 그 결과 태풍 볼라벤(2012년 15호) 사상에서 최대해수 면 발생시점을 예측한 결과 1시간 이내에서 비교적 정확한 예 측성을 확인하였다.

폭풍해일은 즉각적인 예측이 어려운 이유로 인하여 연안 지역 방재계획 수립시 그 특성을 충분히 반영하지 못하는 문 제점이 있다. 현재까지 우리나라 극치해수면 분석시 태풍의 내습을 반영한 분석결과는 미비한 상황이며 확률통계학적으 로 태풍 내습시 발생할 수 있는 폭풍해일 현상에 대한 면밀한 검토가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 태풍 내습시 저기압 특성으로 인하여 유발 되는 폭풍해일 현상의 안전적인 대응을 위하여 활용될 수 있 는 폭풍해일 빈도해석 기법의 적용성을 다각적으로 검토하였 다. 태풍 내습을 고려한 폭풍해일을 확률통계학적으로 평가 하기 위한 본 논문의 연구수행 절차는 Fig. 1과 같이 수립하였 다. 1장에서는 연구배경 및 목적과 관련 연구동향에 대하여 언급하였으며, 2장에서는 태풍 내습시 해수면 변동성을 파악



Fig. 1. Flow diagram of the storm surge frequency analysis

하기 위한 경향성 분석기법과 절점기준 초과치 계열에 대한 폭풍해일 빈도해석 기법에 대하여 상세히 서술하였다. 3장에 서는 본 연구에 활용된 태풍 및 해수면 자료에 대하여 정리하 였으며 경향성 분석기법 및 폭풍해일 빈도해석 기법의 적용결 과를 정리하였다. 4장에서는 폭풍해일 빈도해석 기법의 적용 성 검토결과에 대한 결론 및 토의사항을 수록하였다.

# 2. 연구방법

### 2.1 해수면 자료의 경향성 분석

기상현상이 연속적으로 변동하고 있다는 증거들은 장기간 의 수문기상학적 자료들의 양상을 분석한 다수의 연구사례에 의해 입증되어오고 있으며 수문기상학적 자료에 포함되어 있 는 변동특성은 경향성, 변동점 및 계절성 등 가시적으로 나타나 는 특성들이 많다. 이러한 변동특성은 다각적인 통계기법을 통 해 정량적으로 규명할 수 있다. 정량화된 대표적 변동특성으로 자료 평균값의 경향성 유무와 평균의 유지여부, 분산의 변동특 성, 일변화, 계절변화 및 장주기변화 등 주기특성이 있다.

본 연구에서는 우리나라 주변 해역의 해수면 변동성을 파 악하기 위하여 매개변수적 경향성 분석기법과 비매개변수적 경향성 분석기법을 이용하여 해수면 자료의 경향성을 파악하 였다. 매개변수적 방법으로는 경향성 분석에 가장 일반적으로 사용되는 선형회귀 분석기법을 사용하였으며, 비매개변수적 경향성 분석기법은 자료가 정규분포를 따르지 않더라도 적합 성이 우수한 Mann-Kendall 경향성 분석기법과 Sen's 경향성 분석기법을 사용하였다. 본 연구에서 이용한 경향성 분석기법 은 다양한 연구에서 활용되었으므로 간략하게 서술하였다.

### 2.1.1 선형회귀 분석기법

직관적으로 자료의 경향성을 파악하는데 유리한 선형회귀 분석기법의 기본 조건은 Eq. (1)과 같이 *n*차 방정식으로 표현 할 수 있다. 선형회귀 분석기법은 독립변수 간에는 상관성가 없으며 독립변수와 종속변수는 통계적으로 유의한 인과관계 가 있어야 한다는 가정이 충족되어야 한다.

$$Y = \alpha + \beta_1 \cdot X^1 + \beta_2 \cdot X^2 + \dots + \beta_n \cdot X^n + \epsilon$$
(1)

Eq. (1)에서 일반적으로 X의 변동성에 따라 Y의 변동성을 검토하므로 X를 독립변수, Y를 종속변수로 명명하며  $\epsilon$ 은 정규 분포를 따르는 오차항으로 고려한다. 오차항은 정규성(normality), 등분산성(homoscedasticity) 및 독립성(independency)으로 가정한다. Eq. (1)에서 α와 β는 회귀계수(regression coefficients)로 써 절편(intercept)과 기울기(slope)로 정의된다. 회귀계수추 정은 관측자료와 예측자료의 차이를 의미하는 잔차(residual) 의 제곱합이 최소가 되는 최소자승법(least squares method) 을 적용한다. 선형회귀 분석기법은 고차다항식으로 모형을 구성하는 경우 정확성은 증가하지만 과적합(overfitting)의 문제가 발생할 가능성이 있으므로 본 연구에서는 해수면 자료 의 평균적 변동성을 파악하고자 1차식을 적용하여 경향성을 판별하였다(Cabanes *et al.*, 2001; Church *et al.*, 2006).

### 2.1.2 Mann-Kendall 분석기법

Mann (1945)과 Kendall (1975)에 의하여 도입된 Mann-Kendall (MK) 분석기법은 시계열에 포함되는 결측값을 효율 적으로 고려할 수 있는 장점으로 자료의 경향성 분석에 있어 서 가장 광범위하게 사용되고 있다. MK 분석기법은 모집단 의 형태와 무관하게 분석 자료에 곧바로 통계학적 검정을 하 는 비매개변수적 방법으로 분포무관(distribution-free) 검정 법이라고 명시되기도 한다. 시계열에서 통계적으로 유의한 변화는 MK 분석기법을 통해 판별되며 MK 경향성 분석은 변 량의 순위에 기초하여 통계치를 산정하고 변량이 정규분포를 따르지 않아도 적용이 가능하며 이상치나 왜곡치에 대해서도 영향을 받지 않는다. 또한 선형 혹은 비선형 추세성분에 관계 없이 경향성 검정을 실시한다.

통계적으로 유의성을 판별하기 위하여 사용되는 귀무가설 은 다른 두 변량이 이상적으로 서로 독립된 변량임을 나타내 며 대립가설은 다른 두 변량이 서로 독립되지 않음을 의미한 다. MK 경향성 분석과정은 자료의 수가 n인 변량계열 X에서 Eq. (2)와 같은 S를 통계량으로 정의한다.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} sgn(X_j - X_i)$$
<sup>(2)</sup>

$$E(S) = \mu = 0 \tag{3}$$

$$Var(S) = \sigma^2 = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_i^g t_i (t_i - 1)(2t_i + 5)]$$
 (4)

정의된 통계량 S는 근사적으로 평균 µ와 분산  $\sigma^2$ 을 가지는 정규분포를 따른다. 여기서 g는 X와 동일한 값을 갖는 변량의 수이며,  $t_i$ 는 *i*번째 변량에 속하는 X와 동일한 값을 갖는 변량 의 수이다. 통계량 S가 정규분포를 따르므로 Eq. (5)와 같이 검정 통계치 Z를 계산한다. 산정된 Z를 이용하여 경향성이 없 다는 귀무가설 |u| > Z<sub>1-a/2</sub>의 기각역을 설정하여 경향성 판별 을 수행한다.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{if } S > 0\\ 0 & \text{if } S = 0\\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases}$$
(5)

### 2.1.3 Sen's 분석기법

Sen's 경향성 분석은 비매개변수적 방법으로서 MK 분석 기법과 동일하게 자료에 이상치가 포함되어 있더라도 효과적 인 분석이 가능하다(Salmi *et al.*, 2002). Sen's 경향성 분석과 정은 Eq. (6)과 같이 자료의 선형경사 집합을 산정한다.

$$Q = \frac{X_j - X_i}{j - i} \quad (1 \le i \le j \le n) \tag{6}$$

Eq. (6)에서 Q는 기울기이며 X는 변량, n는 변량의 수이다. Sen's 경향성 분석의 기울기는 변량의 수가 홀수 경우와 짝수 인 경우로 구분하여 Eq. (7)과 같이 중앙값(median)을 산정 한다.

$$S = Q_{[N+1/2]}$$
 (7a)

$$S = Q_{[N/2]} + Q_{[N+1/2]} \tag{7b}$$

Sen's 경향성 분석의 가설검정은 MK 경향성 분석기법과 동일하게 Eq. (4)를 사용하여 분산을 추정하여 검증한다. 귀 무가설에 대하여 Eq. (8)의 정규분포의 유의수준 지점을 나타 내는  $M_1$ 과  $M_2$ 에 해당하는 기울기가 0을 포함하지 않는다는 경우 귀무가설을 기각되어 경향성이 있는 것으로 판별한다 (Gilbert, 1987).

$$M_1 = \frac{N - Z_{1-\alpha} [Var(S)]^{0.5}}{2}$$
(8a)

$$M_2 = \frac{N + Z_{1-\alpha} [Var(S)]^{0.5}}{2}$$
(8b)

# 2.2 Bayesian 기법을 활용한 Peaks Over Threshold 빈도 해석 기법

일반적으로 극치이론(extreme value theory)을 적용하여 빈 도해석을 위해서는 자료의 오른쪽 꼬리의 외삽법(extrapolation) 을 적용하게 되는데 장기간의 자료가 확보되지 않는 경우 오 차가 증가할 수 있는 단점을 가지고 있다. 따라서 자료의 오른 쪽 꼬리에 대한 정보를 추가적으로 확보하기 위하여 절점기준 (threshold)을 설정하여 절점을 초과하는 자료계열을 사용하 는 것이 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

대부분의 태풍은 독립적으로 영향력을 미치기 때문에 태 풍 내습시 해수면 자료는 서로 독립적인 변수로 가정할 수 있 으며 이러한 절점기준 모형의 궁극적인 목적은 빈도해석 과정 의 자료를 확장하는 것으로 이를 통해 매개변수 추정에 대한 신뢰성을 확보하는데 유리하다(Renard *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2010; Solari and Losada, 2012; Wi *et al.*, 2016).

부분기간계열(partial duration series)을 이용하는 POT 빈 도해석 기법은 자료확충, 계절성 확보 및 빈도해석 모형구축 에 널리 활용되고 있으며 본 연구에서 적용한 폭풍해일 빈도 해석 기법은 Kim *et al.* (2018)에서 개발된 이산-연속 분포개 념의 빈도해석 기법을 확장한 모형이다.

해수면 자료를 확률변수 X로 가정하여 특정한 절점기준을 초과하는 초과치 계열은 서로 독립이고 동일한 분포(independent identically distributed, iid)를 따르며 특정분포 F에서 추출되 었다고 가정할 수 있다. 절점기준 u을 초과하는 폭풍해일 자 료를 X-u로 정의하면 폭풍해일 자료의 조건부 확률분포는 Eq. (9)와 같이 정리할 수 있다. 즉, 확률변수 X가 절점기준을 초과할 때 초과치가 x보다 작을 조건부 확률이다.

$$P[X-u \le x | X > u] = \frac{F(x+u) - F(u)}{1 - F(u)}, \ 0 \le x \le x_0 - u$$
(9)

Eq. (9)는 Pickands – Balkema – de Haan 정리에 의하여 Generalized-Pareto(GP) 분포로 수렴이 가능하며 분자와 분 모를 GP분포로 재정리하면 Eq. (10)과 같다(Pickands, 1975).

$$P\{X-u \le x | X > u\} = GPD(x-u|\sigma,\xi) = \left(1 + \frac{\xi(x-u)}{\tilde{\sigma}}\right)^{-\frac{1}{\xi}} (10)$$

Eq. (10)에서  $\tilde{\sigma} \in \sigma + \xi(u-\mu)$ 을 나타낸다. 또한  $\sigma \in \exists R$  매개변수(scale parameter)이며  $\xi \in \delta$  매개변수(shape parameter)로서 GP분포는  $\xi$ 에 따라서 크게 세 가지로 구분될 수 있다.  $\xi > 0$ 이면 두꺼운 꼬리(heavy tail)인 파레토분포,  $\xi = 0$ 이면 중간형 꼬리(medium tail)인 지수분포,  $\xi < 0$ 이면 얇은 꼬리(light tail)를 갖는 제2종(type II) 파레토 분포이다. Eq. (10)에서  $P\{X > u\} = \zeta_u$ 로 나타낼 수 있으며 직관적으로  $\zeta_u \in$ 포아송 과정(Poisson process)을 따르는 것으로 가정할 수 있어 Eq. (11)로 재정리할 수 있다(Furrer and Katz., 2008).

$$P\{X > x\} = \zeta_u [1 + \xi(\frac{x_m - u}{\sigma})]^{-1/\xi} = \frac{1}{m}$$
(11)

이러한 극치사상 분석방법은 Poisson-GP분포로 명시되 어 절점기준을 초과하는 사상의 수가 λ > 0에 대하여 평균이 mλ인 Poisson 분포를 따르며 양적특성은 GP분포를 따르는 확률변수들로 가정하여 이를 관측시계열에 적합 시키는 것이 다. λ는 절점기준을 초과하는 사상의 기댓값으로 본 연구에서 는 연중 태풍 내습횟수로 Eq. (12)로 정의된다.

$$P(X=x) = \frac{e^{-\lambda}\lambda^x}{x!}$$
(12)

최종적으로 특정빈도의 설계해수면은 Eq. (13)과 같은 형 태로 산정된다. 본 연구에서는 GP분포에서 각 매개변수의 추 정을 위하여 발생확률을 최대가 되도록 매개변수를 추정하는 데 있어 Eq. (14)와 같이 우도함수를 정의하였다.

$$x_m = u + \frac{\sigma}{\xi} [(m\zeta_u)^{\xi} - 1] \tag{13}$$

$$L(\lambda,\sigma,\xi) = e^{-m\lambda} \frac{(m\lambda)^n}{n!} \prod_{i=1}^n \left[ \frac{1}{\sigma} \left( 1 + \frac{\xi(x_i - u)}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{\xi} - 1} \right]$$
(14)

Poisson-GP 폭풍해일 빈도해석 기법의 결과비교를 위하 여 해수면 빈도해석에서 널리 사용되고 있는 GEV 분포형을 활용하였다. GEV 분포의 확률밀도함수는 Eq. (15)와 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\xi} \left[ 1 - \sigma(\frac{x-\mu}{\xi}) \right]^{(1/\sigma)-1} \exp\left[ (1 - \sigma(\frac{(x-\mu)}{\xi})^{1/\sigma} \right] (15)$$

Eq. (15)에서  $\mu$ 는 위치 매개변수(location parameter)를 의미하며 GP분포와 동일하게 매개변수 추정과정은 최우도 법을 활용하였다. 예를 들어, 표본자료가 길이 dx인 구간으로 나누어져 있고, 관측자료( $x_1, x_2, \dots, x_n$ )가 독립이고 균등분포인 표본이 주어져 있다고 가정하면,  $X = x_i$ 에 대한 확률밀도의 값 은  $f(x_i)dx$ 이 된다. 관측자료는 *iid* (independently identical distribution) 조건을 따르므로 관측자료가 발생할 결합확률은 Eq. (16)과 같다. 관측자료의 결합확률을 최대화하는 것은 우도 함수를 최대화 하는 것과 같으며, 우도함수는 Eq. (17)과 같다.

$$f(x_1)dx \cdot f(x_2)dx \cdots f(x_n)dx = [\prod_{i=1}^n f(x_i)]dx^n$$
(16)

$$L = \prod_{i=1}^{n} f(x_i) \tag{17}$$

GEV 분포를 활용하여 특정빈도의 설계해수면을 산정하 기 위하여 본 연구에서는 누가분포함수의 역함수를 적용하였 다. 즉, 재현기간 *T*에 대한 설계해수면을 산정과정은 Eq. (18) 과 같다.

$$x_T = x_0 + \frac{\alpha}{\beta} \left[ 1 - \ln \left\{ 1 - (1 - \frac{1}{T}) \right\}^{\beta} \right]$$
(18)

### 2.2.1 Bayesian Markov Chain Monte Carlo 기법

Bayesian 기법은 매개변수 추정 및 불확실성 정량화를 목 적으로 확률통계학에서 광범위하게 활용되고 있으며 Bayesian 기법의 관점에서 매개변수는 결정적인 값으로 고려되는 것이 아니며 확률분포형을 이용하여 매개변수의 불확실성을 정 량화할 수 있다. 즉, 사전확률(prior distribution,  $p(\theta|y)$ )이 주 어지는 경우에 발생할 가중치를 의미하는 우도(likelihood,  $p(y|\theta)$ )를 활용하여 사후확률(posterior distribution, $p(\theta|y)$ ) 을 추론하며 수식으로 정리하면 Eq. (19)와 같다.

$$p(\theta|y) = \frac{p(\theta)p(y|\theta)}{p(y)}$$
(19)

Bayesian 기법의 적용과정에서 자료의 양이 충분하지 못하면 매개변수의 사전분포에 의존도가 높아질 수 있다. 매개변수의 사전분포의 선택은 매개변수의 특성파악으로 결정될 수 있는데 본 연구에서는 매개변수 추정에 필요한 매개변수의 개수보다 자료가 충분하다는 조건으로 가정하 여 무정보(non-informative) 사전분포를 사용하였다. 즉, 매개변수가 서로 독립이며 평평한 형태의 분산 값이 매우 큰 균등분포(uniform distribution)형태의 무정보 사전분 포를 만족한다고 가정한다(Gelman, 2006). 본 연구에서는 Eq. (20)과 같이 확률분포형의 매개변수의 사전분포를 가 정하였다.

$$\mathbf{X}_{t,s} \sim GPD(u_s, \sigma_s, \xi_s) \quad s = 1, ..., n$$
 (20a)

$$\sigma_s \sim G(k_\sigma, \tau_\sigma) \qquad s = 0, .., n \tag{20b}$$

$$\xi_s \sim N(\mu_{\xi}, \sigma_{\xi}) \qquad s = 0, .., n \tag{20c}$$

Poisson-GP 폭풍해일 빈도해석 기법의 매개변수를 추정 하기 위하여 다변량 조건이며 직접적으로 표본생성이 불가능 한 상태에서 임의의 분포에서 표본을 생성하는데 일반적으로 사용되는 Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 기법의 Gibbs 표본법을 활용하여 매개변수를 추정하였다. Gibbs 표본법은 현재시점의 매개변수들의 값은 정확하게 바로 직전의 추출된 값들이 사용되므로 상호독립이 아니라 상관관계가 있는 종속 성을 가지게 된다. 조건부 분포에서 추출된 난수들이 안정 상 태(stable state)에 도달하기까지 초기의 일정부분의 난수를 제 거한 이후의 난수들을 이용한다. 본 연구에서는 표본이 효과 적으로 혼합되어 추출되도록 3개의 병렬체인을 이용하여 수 렴여부를 확인하였고 10,000개의 표본을 반복생성한 후, 초 기 난수의 영향을 제거하기 위하여 처음의 5,000개의 난수를 제거하였다.

# 3. 분석자료 및 연구결과

## 3.1 해양관측 자료 및 태풍정보

해양관측의 궁극적인 목적은 주기적으로 관측 및 분석을 통하여 폭풍해일 및 지진해일(tsunami) 등과 같은 해양지역 에서 발생할 수 있는 현상을 사전에 인지하고 피해를 최소화 하기 위하여 해안구조물 설계과정에 필요한 기초자료를 취득 하기 위함이다.

국립해양조사원에서는 해수면, 파고, 수온, 염분 및 기압 등과 같은 해양관측요소를 관측하기 위한 네트워크 KOON (Korea Ocean Observing Network)을 구축하여 관측된 자료 를 실시간으로 제공하고 있으며 본 연구에서는 KOON에서 제 공하는 총 46개 조위 관측소 중에서 폭풍해일 빈도해석이 가 능한 30년 이상의 자료를 보유하고 있는 총 20개 지점의 해수 면 관측자료를 활용하였다.

Table 1 and Fig. 2는 국립해양조사원에서 운영 중인 해수 면 관측소와 본 연구에서 활용한 해수면 관측소의 정보를 정 리한 것이다. 인천 관측소와 평택 관측소는 관측년수가 30년 이상이지만 관측소의 유지관리 및 이전으로 인하여 결측기간 이 1년 이상 발생한 관측소의 자료는 불확실한 자료를 제공할 가능성이 고려되어 분석에서 제외하였다.

기상청에서 정의하는 내습태풍은 32~42°N, 120~135E° 의 영역을 통과하는 태풍으로 정의하고 있다. 본 연구에서 우리 나라 내습태풍을 선별하기 위하여 일본 기상청 산하의 지역 특 별 기상센터(Regional Specialized Meteorological Centers-Tokyo Typhoon Center, RSMC)와 미국 합동태풍 경보센터 (Joint Typhoon Warning Center, JTWC)에서 제공하는 Best track 태풍 위·경도 정보를 활용하였다.

지리적으로 중위도에 위치한 한반도는 한 해에 약 3~4개



Fig. 2. Locations of sea level stations by Korea hydrographic and oceanographic agency

Table 1. Sea Level observatory used in this study

Station Name	Observation Start Date	Latitude	Longitude
Anheung	1986.10.01	36°40′25″	126°07′ 56″
Boryeoung	1985.09.01	36°24′23″	126°29′ 10″
Busan	1956.01.01	35°05′47″	129°02′07″
Chujado	1983.10.01	33°57′43″	126°18′01″
Heuksando	1965.08.01	34°41′03″	125°26′ 08″
Gadukdo	1977.01.01	35°01′27″	128°48′ 39″
Geomundo	1982.01.01	34°01′42″	127°18′ 32″
Gunsan	1980.02.01	35°58′32″	126°33′47″
Jeju	1964.01.01	33°31′39″	126°32′35″
Mokpo	1956.01.01	34°46′47″	126°22′32″
Mukho	1965.02.01	37°33′01″	129°06′ 59″
Pohang	1971.05.01	36°02′50″	129°23′02″
Seogwipo	1985.01.01	33°14′24″	126°33′42″
Sokcho	1973.12.01	38°12′26″	128°35′ 39″
Tongyoung	1976.02.01	34°49′40″	128°26′ 05″
Ulleungdo	1965.09.01	37°29′29″	130°54′49″
Ulsan	1962.09.01	35°30′07″	129°23′ 14″
Wando	1983.01.01	34°18′56″	126°45′35″
Wido	1985.01.01	35°37′05″	126°18′06″
Yeosu	1965.02.01	34°44′ 50″	127°45′ 56″

정도의 태풍내습하며 8월, 7월9월순으로 자주 내습한다. 7월 부터 9월동안에 내습하는 태풍 횟수는 전체의 90%이며 매우 드물게 6월 및 10월에 내습하는 경우도 있다. 국가태풍센터 (http://typ.kma.go.kr/)에서 제공하는 연도별 태풍발생 및 우 리나라에 영향을 준 태풍현황은 Table 2와 같다. 1987년부터 2016년까지 발생한 태풍은 총 760개이며 이 중에서 92개의 태풍이 우리나라에 내습하였다. 이례적으로 1988년과 2009 년의 경우 우리나라를 내습한 태풍은 0회로 확인되었다. 앞서 서술한바와 같이 태풍의 특성상 한 해에 강한 태풍이 1회 이상 내습하는 경우와 특정 해에 태풍이 내습하시 않은 경우가 있 으므로 해수면 연 최대치를 추출하면 태풍으로 유발되는 폭풍 해일 사상이 누락되거나 폭풍해일에 비하여 작은 값들이 포함 되어 빈도해석을 수행하는데 정확성이 떨어질 수 있다.

본 연구에서 Poisson-GP 폭풍해일 빈도해석 기법의 적용 과정에서 절점기준을 초과하는 횟수로 고려되는 우리나라를 내습한 태풍횟수에 대하여 경향성이 있는지 사전에 검토할 필요가 있다. 절점기준의 초과횟수에 따라서 비정상성 모형 으로의 확장 필요성을 판단하기 위함이다. Fig. 3은 연도별로 우리나라를 내습하는 태풍횟수에 대하여 선형회귀 분석결과 로 선형회귀식의 기울기가 0.0004로 산정되었으며 MK 경향 성 및 Sen's 경향성 분석결과 우리나라를 내습한 태풍횟수는 증가경향이 없는 것으로 고려하였다. 즉 절점기준을 초과하 는 사상의 기댓값 λ는 정상성으로 가정된다.

우리나라를 내습하는 태풍횟수가 증가경향이 없다고 하더라고 해수면 온도상승으로 인한 태풍의 강도와 크기가 증가하

 
 Table 2. The yearly number of typhoons, with number affecting the Korean peninsula in parentheses

Year	Typhoon Genesis	Year	Typhoon Genesis
1987	23(3)	2002	26(4)
1988	31(0)	2003	21(4)
1989	32(2)	2004	29(5)
1990	29(4)	2005	23(1)
1991	29(5)	2006	23(3)
1992	31(2)	2007	24(3)
1993	28(4)	2008	22(1)
1994	36(5)	2009	22(0)
1995	23(3)	2010	14(3)
1996	26(2)	2011	21(3)
1997	28(4)	2012	25(5)
1998	16(2)	2013	31(3)
1999	22(5)	2014	23(4)
2000	23(5)	2015	27(4)
2001	26(1)	2016	26(2)

고 있는 것은 다양한 연구사례(Emanuel, 2005; Suzuki et al., 2013)를 통하여 보고되고 있으며 본 연구에서는 태풍의 내습 횟수를 폭풍해일을 평가하는 주요 인자로 활용하였다. Kim and Kwon (2016)의 선행연구에서 우리나라 태풍과 연계된 위험기상현상에 영향을 미치는 것은 동중국해 지역의 저기압 특성과 북태평양 고기압 특성인 점을 고려하여 태풍의 강도를 직관적으로 파악할 수 있는 태풍 중심기압의 변동성 검토결과 를 Fig. 4에 제시하였다. 1980년대 후반부터 우리나라를 내습 하는 태풍의 중심기압이 감소하고 있는 것을 확인하였다. 즉, 지구온난화 진행에 따른 해수면 온도상승은 태풍의 강도를 상향시키고 있는 것으로 사료된다.

Poisson-GP 폭풍해일 빈도해석 기법의 적용에 있어서 선 행적으로 고려되어야 하는 것은 절점기준의 설정이다. 절점 기준이 상대적으로 작게 설정되는 경우에는 분석자료 수가 증가하므로 매개변수 추정의 분산은 작아지는 반면에 편의가 증가한다. 대조적으로 절점기준을 크게 설정하는 경우에는



Fig. 3. The number of typhoons and its trend during the period of 1987~2016



Fig. 4. Time series of low pressure of typhoons during the period 1987~2016

편의는 감소하지만 분산은 증가하는 문제점이 나타날 수 있 다. 본 연구에서는 태풍 내습특성을 고려한 설계해수면을 산 정하는데 주안점을 두고 있기 때문에 태풍이 내습한 시기의 해수면을 폭풍해일로 고려하여 92회 태풍내습 시기의 최저 해수면을 절점기준으로 설정하였다. 즉, 태풍으로 인하여 해 수면이 상승하는 경우의 최저 해수면을 초과하는 경우에 대한 폭풍해일 빈도해석을 수행하였다.

태풍 내습시 태풍강도의 차이로 인하여 지점별로 절점기 준을 고려하였으며 각 지점의 절점기준 및 평균해수면은 Table 3과 같다. 묵호 지점의 경우 평균해수면과 절점기준의 약 1.9배의 차이를 보였으며 전체적으로는 약 1.61배의 차이 를 보이고 있다. 평균해수면과 절점기준의 차이가 클수록 태 풍 내습시 해수면 상승경향이 높은 것으로 평가할 수 있다. 예 외적으로 울릉도 지점의 경우 평균해수면과 절점기준이 동일 한 것을 확인하였다. 이와 같은 원인은 한반도를 내습하는 대 부분의 태풍은 편서풍의 영향으로 북동쪽으로 진행하게 되는 데 내륙지역에서 온대저기압으로 세력이 약화되어 동해상에 서 소멸하는 특성으로 울릉도 지점의 경우 소멸단계에 근접한 태풍이 내습하는 경우가 많으므로 태풍의 저기압 특성으로 나타나는 해수면 변동성이 작다는 것으로 사료된다.

#### Table 4. Significance test results of storm surge data set

Station	Se	a level	Station	Se	Sea level		
Name	Mean	Threshold	Name	Mean	Threshold		
Anheung	360	614	Mukho	20	38		
Boryeoung	390	672	Pohang	22	28		
Busan	71	122	Seogwipo	164	251		
Chujado	178	278	Sokcho	24	42		
Heuksando	189	324	Tongyoung	148	241		
Gadukdo	101	174	Ulleungdo	22	22		
Geomundo	181	292	Ulsan	33	55		
Gunsan	366	640	Wando	208	343		
Jeju	161	241	Wido	334	534		
Mokpo	251	406	Yeosu	186	311		

Table 3. Sea level stations used in this study (unit: cm)

### 3.2 우리나라 태풍내습 경향성 분석결과

폭풍해일시 해수면 자료를 대상으로 경향성 분석결과를 Table 4에 정리하였다. MK 경향성 분석 및 Sen's 경향성 분석 의 귀무가설의 기각판별을 위하여 유의수준은 0.05로 고려하 였다. 선형회귀 경향성 판별결과에서는 20개 모든 지점에서 폭풍해일의 증가경향성이 존재하는 것으로 나타났으며 목포

Station Nama	Linear R	egression	MK	Test	Sen's Test		
Station Name	Slope	Signigicance	Z-value	Signigicance	Slope	Signigicance	
Anheung	0.365	0	2.037	0	0.374	0	
Boryeoung	0.397	0	1.902	0	0.394	0	
Busan	0.159	0	2.192	0	0.150	0	
Chujado	0.291	0	1.649	0	0.327	0	
Heuksando	0.215	0	4.064	0	0.209	0	
Gadukdo	0.179	0	2.590	0	0.200	0	
Geomundo	0.271	0	3.261	0	0.304	0	
Gunsan	0.242	0	2.837	×	0.238	0	
Jeju	0.273	0	4.661	0	0.285	0	
Mokpo	0.596	0	2.337	0	0.601	0	
Mukho	0.084	0	4.988	0	0.083	0	
Pohang	0.235	0	3.646	0	0.267	0	
Seogwipo	0.208	0	1.602	0	0.221	0	
Sokcho	0.119	0	3.649	0	0.133	0	
Tongyoung	0.179	0	3.315	0	0.171	0	
Ulleungdo	0.204	0	2.516	0	0.214	0	
Ulsan	0.074	0	3.771	×	0.078	0	
Wando	0.167	0	3.063	0	0.205	0	
Wido	0.318	0	2.691	×	0.270	0	
Yeosu	0.123	0	2.890	0	0.149	0	

지점의 폭풍해일 증가경향성이 가장 높은 것으로 나타났다. 증가경향이 가장 작은 지점은 울산 지점으로 확인되었다.

폭풍해일시 해수면 자료의 MK 경향성 분석결과는 군산, 울산 및 위도 지점에서 폭풍해일의 증가경향의 유의성이 없는 것으로 나타났으며 그 외의 지점은 폭풍해일의 증가경향의 유의성을 확인하였다. Sen's 경향성 분석결과는 목포 지점의 증가경향이 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 선형회귀 경향 성 분석결과와 일치되는 결과이며 MK 경향성 분석기법에서 증가경향의 유의성이 없는 지점으로 결정된 군산, 울산 및 위 도 지점의 Sen's 경향성 분석결과 폭풍해일의 증가경향이 존 재하는 것으로 평가되었다. 이러한 원인은 Fig. 4에서 확인한 바와 같이 태풍의 중심기압이 낮아짐에 따라 해수면 상승효과 의 증가로 사료된다. 추가적으로 경향성 분석기법의 특성에 따라서 동일한 지점의 자료에 상반된 경향성 분석결과를 제시 할 수 있음을 확인하였다. 사용되는 최우도법, 확률가중모멘트 및 L-모멘트법 등은 많 은 불확실성이 존재하지만 편리성의 사유로 정규분포를 따르 는 매개변수의 신뢰구간을 제시하는 수준에서 불확실성 평가 를 수행하고 있다.

본 연구에서 사용한 자료기간은 30년으로 일반적으로 확 률통계학적 빈도해석을 수행하는데 필요하다고 알려진 25년 을 상회하는 자료기간으로 정량적 신뢰도가 확보된 분석결과 를 제시할 것으로 사료되며 매개변수 추론에 적용한 Bayesian 기법은 매개변수의 불확실성을 확률분포의 형태로 평가할 수 있다. Tables 5~7는 Bayesian MCMC 기반의 GP분포 매개변 수의 통계치(표준편차, 중앙값 및 불확실성 구간) 및 Poisson 분포의 기댓값(expected value, λ)을 정리한 것이다. λ의 값은 폭풍해일의 발생 가능성으로 연계되는 태풍 내습빈도를 의미

Table 5. Estimated parameter  $(\lambda)$  of the Poisson distribution and its uncertainty bounds

# 3.3 불확실성을 고려한 폭풍해일 설계해수면 산정결과

기존의 빈도해석은 확률분포형의 매개변수 추정과정에서

Parameter	SD	5%	Median	95%
λ	0.3171	2.554	3.047	3.597

Table 6. Estimated scale parameter ( $\sigma$ ) of the GP distribution and its credible bounds

Station Name	SD	5%	Median	95%	Station Name	SD	5%	Median	95%
Anheung	6.063	84.700	94.880	105.100	Mukho	5.349	35.160	44.290	51.890
Boryeoung	5.034	91.740	100.800	108.700	Pohang	5.714	43.440	52.340	62.410
Busan	5.124	29.740	38.235	46.600	Seogwipo	4.459	62.380	69.460	77.150
Chujado	6.533	55.595	64.010	76.930	Sokcho	7.356	34.910	42.600	59.390
Heuksando	5.392	45.220	53.840	62.930	Tongyoung	6.472	43.255	52.860	64.480
Gadukdo	4.802	39.570	47.880	55.180	Ulleungdo	4.854	50.620	59.180	66.190
Geomundo	5.957	56.640	68.110	76.630	Ulsan	5.571	34.230	42.390	52.890
Gunsan	5.225	80.640	90.410	97.050	Wando	6.037	63.570	74.600	83.830
Jeju	3.504	60.680	66.560	72.780	Wido	5.495	111.300	120.700	129.300
Mokpo	7.129	81.180	91.130	104.600	Yeosu	7.220	60.170	66.880	85.030

**Table 7.** Estimated shape parameter ( $\xi$ ) of the GP distribution and its credible bounds

Station Name	SD	5%	Median	95%	Station Name	SD	5%	Median	95%
Anheung	0.043	-0.598	-0.516	-0.439	Mukho	0.115	-0.881	-0.738	-0.538
Boryeoung	0.037	-0.558	-0.524	-0.438	Pohang	0.089	-0.783	-0.645	-0.501
Busan	0.096	-0.475	-0.362	-0.168	Seogwipo	0.051	-0.790	-0.704	-0.619
Chujado	0.078	-0.764	-0.609	-0.488	Sokcho	0.149	-1.013	-0.685	-0.501
Heuksando	0.066	-0.321	-0.240	-0.139	Tongyoung	0.068	-0.313	-0.215	-0.108
Gadukdo	0.076	-0.678	-0.571	-0.448	Ulleungdo	0.068	-0.775	-0.689	-0.568
Geomundo	0.080	-0.773	-0.665	-0.509	Ulsan	0.103	-0.657	-0.490	-0.301
Gunsan	0.061	-0.546	-0.502	-0.415	Wando	0.072	-0.827	-0.737	-0.558
Jeju	0.043	-0.825	-0.746	-0.653	Wido	0.033	-0.592	-0.558	-0.477
Mokpo	0.067	-0.736	-0.627	-0.524	Yeosu	0.085	-0.861	-0.627	-0.590

GEV 분포의 매개변수를 활용하여 재현기간에 따른 설계해 수면을 도시한 결과이다. 대부분의 지점에서 GEV 분포로 산 정된 설계해수면이 Poisson-GP 폭풍해일 빈도해석 기법으로 산정된 설계해수면의 불확실성 구간에 포함되는 것을 확인할

하는 것으로 분석대상 지점의 경우 평균적으로 1년에 3회 이 상의 폭풍해일의 발생가능성이 있는 것으로 평가할 수 있다.

Fig. 5는 Poisson-GP 폭풍해일 빈도해석 기법에 대하여 Bayesian MCMC 모의로 산정된 매개변수와 비교모형인



Fig. 5. Design storm surge level and its uncertainty over all stations



Fig. 5. Design storm surge level and its uncertainty over all stations (Continue)

수 있으며 GEV 분포의 신뢰구간은 좌우대칭 형태를 나타내 고 있으며, 이는 오차의 분포를 정규분포로 가정한 결과이다. 그에 반해, Poisson-GP 폭풍해일 빈도해석 기법은 재현기간 이 증가함에 따라 불확실성 구간의 범위가 증가하는 것을 확 인할 수 있다. 이와 같은 결과를 바탕으로 본 연구에서 개발된 Poisson-GP 폭풍해일 빈도해석 기법은 연안지역의 폭풍해일 발생빈도 및 크기를 정량적으로 제시하여 해안구조물의 설계 에 활용이 될 수 있을 것으로 사료된다. 추가적으로 수심 및 복 잡한 해안선 등과 같은 지역성을 고려한 빈도해석 기법으로 확장하는 경우 관측이 어려운 해양에서의 설계해수면을 통계 학적 추론에 의하여 제시하여 폭풍해일 방재지도 작성 등에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

# 4. 결 론

본 연구는 폭풍해일 방재대응을 위한 기초자료를 제공하기 위하여 국내 해수면 변동성을 태풍의 영향과 연계된 Poisson-GP 폭풍해일 빈도해석 기법을 개발하였다. 이를 위하여 우리 나라 해수면 관측자료 및 태풍내습 현황을 연구대상으로 선정 하여 분석을 실시하였다. 세부적으로는 태풍 내습시 발생할 수 있는 폭풍해일을 보다 면밀히 검토하고자 태풍 내습시 해 수면 상승 경향성을 검토하였다. 이를 확장하여 Bayesian 기 법 기반의 Poisson-GP 폭풍해일 빈도해석 기법을 활용하여 장기간의 해수면 자료와 태풍 내습자료를 이용하여 설계해수 면을 산정하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같이 요 약할 수 있다. 첫째, 태풍 내습기간의 해수면에 대하여 서로 다른 경향성 분석을 수행하였다. 경향성 분석기법에 따라서 일부지점에 서 상반된 결과를 제시하였지만 분석을 수행한 20개 지점의 폭풍해일 자료는 증가경향성을 나타내고 있는 것으로 판단된 다. 이러한 맥락에서 지구온난화로 인한 해수면 온도상승은 태풍의 강도를 증가시키는 요인으로 작용할 것으로 판단되 며, 향후 연안지역의 침수대책을 수립시 해수면 상승 영향을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

둘째, 기존의 결정론적 빈도해석 기법에서 고려되지 못한 매 개변수의 불확실성과 비정상성을 고려하기 위한 연구를 수행 하였다. 즉, 지구온난화로 인한 태풍의 발생빈도 및 강도의 변 동성을 정량적으로 고려하기 위하여 본 연구에서는 Bayesian 기법과 연계한 Poisson-GP 폭풍해일 빈도해석 기법을 적용 하여 설계해수면을 재평가 하였다. Bayesian 통계기법을 기 반으로 태풍 내습시 유발되는 폭풍해일을 보다 효과적으로 평가하기 위하여 빈도해석 과정의 매개변수의 불확실성과 외 부인자를 고려하였다. 즉 태풍의 변동성이 반영된 폭풍해일 빈도해석 결과를 정량적으로 제시할 수 있었다.

셋째, 전체지점에서 Poisson-GP 폭풍해일 빈도해석 기법 으로 산정된 설계해수면이 GEV 분포로 산정된 설계해수면 에 비하여 약 5%의 상향된 결과를 제시하였으며 Poisson-GP 폭풍해일 빈도해석으로 산정된 설계해수면을 해안구조물 설 계과정에서 활용하는 경우 방재측면에서 보다 효율적인 평가 를 가능케 할 것으로 판단된다. 추가적으로 부산 및 묵호 지점 의 경우 약 300년 빈도 이상의 결과에서는 GEV 분포로 산정 된 설계해수면이 역전되는 현상을 확인할 수 있었다.

향후 연구로서 국내외 수치예보 모형 결과와 기후인자와 원격상관성을 이용하여 비정상성 모형기반의 예측모형으로 서 활용성을 개선할 필요할 있을 것으로 판단되며, 이를 통해 동적모형 기반의 폭풍해일 위험도 해석 절차개발로 확장도 가능할 것으로 판단된다.

# 감사의 글

본 연구는 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재 단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2018R1A 6A3A11047264)이며 주저자는 전북대학교 방재연구센터 에 소속되어 연구를 수행하였습니다.

# References

- Cabanes, C., Cazenave, A., and Le Provost, C. (2001). "Sea level rise during past 40 years determined from satellite and in situ observations." *Science*, Vol. 294, No. 5543, pp. 840-842.
- Church, J. A., and White, N. J. (2006). "A 20th century acceleration in global sea-level rise." *Geophysical research letters*, Vol. 33, No. 1.
- Emanuel, K. (2005). "Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years." *Nature*, Vol. 436, No. 7051, pp. 686.
- Fleming, J. G., Fulcher, C. W., Luettich, R. A., Estrade, B. D., Allen, G. D., and Winer, H. S. (2008). "A real time storm surge forecasting system using ADCIRC." *In Estuarine and Coastal Modeling*, pp. 893-912.
- Furrer, E. M., and Katz, R. W. (2008). "Improving the simulation of extreme precipitation events by stochastic weather generators." *Water Resources Research*, Vol. 44, No. 12.
- Gelman, A. (2006). "Prior distributions for variance parameters in hierarchical models." *Bayesian analysis*, Vol. 1, No. 3, pp. 515-534.
- Gilbert, R. O. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- Guo, Y., Zhang, J., Zhang, L., and Shen, Y. (2009). "Computational investigation of typhoon-induced storm surge in Hangzhou Bay, China." *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 85, No. 4, pp. 530-536.
- Kendall, K. (1975). "Thin-film peeling-the elastic term." Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 8, No. 13, p. 1449.
- Kim, T.-J., and Kwon, H.-H. (2016). "Analysis of Changes in Rainfall Frequency Under Different Thresholds and Its Synoptic Pattern." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 36, No. 5, pp. 791-803 (in Korean).
- Kim, T.-J., Hwang, K.-N., and Kwon, H.-H., (2018). "Stochastic analysis of typhoon-induced storm surge in the coastal area of the Korean peninsula: inference from a nonstationary, Bayesian Poisson generalized Pareto distribution." *Journal of Coastal Research*, No. 85, pp. 896-900.
- Kim, T.-J., Kwon, H.-H., and Kim, K. Y. (2014). "Assessment of typhoon trajectories and synoptic pattern based on probabilistic cluster analysis for the typhoons affecting the korean peninsula." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 4, pp. 385-396 (in Korean).
- Kwon, S. J., Moon, I. J., and Lee, E. I. (2008). "A Study on the longterm variations of annual maximum surge heights at sokcho and mukho harbors." *Journal of Korean Society of Coastal* and Ocean Engineers, Vol. 20, No. 6, pp. 564-574 (in Korean).
- Lee, J.-J., Kwon, H.-H., and Hwang, K.-N. (2010). "Concept of seasonality analysis of hydrologic extreme variables and design rainfall estimation using nonstationary frequency analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 8, pp. 733-745 (in Korean).
- Lima, C. H., Lall, U., Troy, T. J., and Devineni, N. (2015). "A climate informed model for nonstationary flood risk prediction: Application to Negro River at Manaus, Amazonia." *Journal of Hydrology*, Vol. 522, pp. 594-602.

- Lin, I. I., Wu, C. C., Emanuel, K. A., Lee, I. H., Wu, C. R., and Pun, I. F. (2005). "The interaction of Supertyphoon Maemi (2003) with a warm ocean eddy." *Monthly Weather Review*, Vol. 133, No. 9, pp. 2635-2649.
- Lin, N., Emanuel, K. A., Smith, J. A., and Vanmarcke, E. (2010). "Risk assessment of hurricane storm surge for New York City." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 115, No. D18.
- Lopeman, M., Deodatis, G., and Franco, G. (2015). "Extreme storm surge hazard estimation in lower Manhattan." *Natural Hazards*, Vol. 78, No. 1, pp. 355-391.
- Mann, H. B. (1945). "Nonparametric tests against trend." *Econometrica:* Journal of the Econometric Society, Vol. 13, No. 3, pp. 245-259.
- Mann, H. B. (1945). "Nonparametric tests against trend." *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, Vol. 13, No. 3, pp. 245-259.
- Martins, E. S., and Stedinger, J. R. (2001). "Generalized maximum likelihood pareto-poisson estimators for partial duration series." *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 10, pp. 2551-2557.
- Mattocks, C., Forbes, C., and Ran, L. (2006). "Design and implementation of a real-time storm surge and flood forecasting capability for the State of North Carolina." UNC-CEP Technical Report, Vol. 103.
- Papagiannaki, K., Lagouvardos, K., and Kotroni, V. (2013). "A database of high-impact weather events in Greece: a descriptive impact analysis for the period 2001-2011." *Natural Hazards* and Earth System Sciences, Vol. 13, No. 3, pp. 727.
- Pickands III, J. (1975). "Statistical inference using extreme order statistics." *The Annals of Statistics*, Vol. 3, No. 1, pp. 119-131.
- Pugh, D. (2004). Changing sea levels: effects of tides, weather and climate. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Rego, J. L., and Li, C. (2010). "Nonlinear terms in storm surge predictions: effect of tide and shelf geometry with case study from hurricane rita." *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 115, p. C06020.

- Renard, B., Lang, M., and Bois, P. (2006). "Statistical analysis of extreme events in a non-stationary context via a Bayesian framework: case study with peak-over-threshold data." *Stochastic environmental research and risk assessment*, Vol. 21, No. 2, pp. 97-112.
- Salmi, T. (2002). Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates-the Excel template application MAKESENS. Ilmatieteen laitos.
- Shi, J., and Cui, L. (2012). "Characteristics of high impact weather and meteorological disaster in Shanghai, China." *Natural hazards*, Vol. 60, No. 3, pp. 951-969.
- Solari, S., and Losada, M. A. (2012). "A unified statistical model for hydrological variables including the selection of threshold for the peak over threshold method." *Water Resources Research*, Vol. 48, No. 10.
- Suh, S. W., Lee, H. Y., Kim, H. J., and Park, J. S. (2012). "Near real-time immediate forecasting of storm surge based on typhoon advisories." *Journal of Korean Society of Coastal* and Ocean Engineers, Vol. 24, No. 5, pp. 352-365 (in Korean).
- Suzuki, S., Vadas, S. L., Shiokawa, K., Otsuka, Y., Kawamura, S., and Murayama, Y. (2013). "Typhoon-induced concentric airglow structures in the mesopause region." *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, No. 22, pp. 5983-5987.
- Wakelin, S. L., Woodworth, P. L., Flather, R. A., and Williams, J. A. (2003). "Sea-level dependence on the NAO over the NW european continental shelf." *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, No. 7.
- Webster, P. J., Holland, G. J., Curry, J. A., and Chang, H. R. (2005). "Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment." *Science*, Vol. 309, No. 5742, pp. 1844-1846.
- Wi, S., Valdés, J. B., Steinschneider, S., and Kim, T. W. (2016). "Non-stationary frequency analysis of extreme precipitation in South Korea using peaks-over-threshold and annual maxima." *Stochastic environmental research and risk assessment*, Vol. 30, No. 2, pp. 583-606.