

확률론적 합성태풍을 이용한 서남해안 빈도 해일고 산정 Estimation of Frequency of Storm Surge Heights on the West and South Coasts of Korea Using Synthesized Typhoons

김현정* · 서승원**

HyeonJeong Kim* and SeungWon Suh**

요지 : 폭풍으로 인한 연안재해 피해에 대한 적절한 대응책을 수립하기 위해서는 빈도 해일고 산정에 대한 연구가 필요하다. 과거에 관측된 태풍은 모집단 수가 적기 때문에 tropical cyclone risk model(TCRM)을 이용해 역사태풍의 이동경로와 중심기압을 확률밀도함수로 추정하여 확률적으로 발생하는 176,689개의 합성태풍을 생성하였다. 아울러 중국 남동부 연안으로 상륙한 후 재부상 하거나 소멸되는 태풍 특성을 합성태풍에 고려하기 위해 역사태풍의 이동 각도를 확률밀도함수로 추정하고 감쇠 매개변수와 함께 적용하여 중국 남동부 연안에서 서남해안으로 이동하는 태풍의 통과율이 개선되었다. 태풍속성은 역사태풍으로부터 분석하였으며 중심기압과 최대풍속(V_{max}), 최대풍속 반경(R_{max})의 상관관계식을 산정하여 합성태풍에 적용하였다. 해일고는 ADCIRC 모형을 이용해 조석과 합성태풍을 고려하여 산정하였으며 Perl script로 자동화하였다. 확률적으로 발생시킨 합성태풍에 의한 해일고는 실제 자연현상에서 발생하는 해일고와 유사하게 나타나기 때문에 빈도 해일고를 산정할 수 있다. 따라서 일반화된 극치분포(Generalized Extreme Value, GEV)의 모수를 추정하여 극치 해일고를 산정하였으며, 100년 빈도 해일고는 경험모의기법으로 산정한 빈도 해일고와 비교하여 만족스러운 결과가 도출되었다. 본 연구에서 제안한 방법은 일반 해역에서 빈도 해일고 산정시 활용될 수 있다.

핵심용어 : 합성태풍, 태풍 속성, ADCIRC 모형, 확률밀도함수, 빈도 해일고

Abstract : To choose appropriate countermeasures against potential coastal disaster damages caused by a storm surge, it is necessary to estimate the frequency of storm surge heights estimation. As the coastal populations size in the past was small, the tropical cyclone risk model (TCRM) was used to generate 176,689 synthetic typhoons. In simulation, historical paths and central pressures were incorporated as a probability density function. Moreover, to consider the typhoon characteristics that resurfaced or decayed after landfall on the southeast coast of China, incorporated the shift angle of the historical typhoon as a function of the probability density function and applied it as a damping parameter. Thus, the passing rate of typhoons moving from the southeast coast of China to the south coast has improved. The characteristics of the typhoon were analyzed from the historical typhoon information using correlations between the central pressure, maximum wind speed (V_{max}) and the maximum wind speed radius (R_{max}); it was then applied to synthetic typhoons. The storm surges were calculated using the ADCIRC model, considering both tidal and synthetic typhoons using automated Perl script. The storm surges caused by the probabilistic synthetic typhoons appear similar to the recorded storm surges, therefore this proposed scheme can be applied to the storm surge simulations. Based on these results, extreme values were calculated using the Generalized Extreme Value (GEV) method, and as a result, the 100-year return period storm surge was found to be satisfactory compared with the calculated empirical simulation value. The method proposed in this study can be applied to estimate the frequency of storm surges in coastal areas.

Keywords : synthetic typhoon, typhoon characteristics, ADCIRC model, probability density function, frequency storm surge

*군산대학교 대학원 해양산업공학과(Department of Ocean Science & Engineering, Kunsan National University)

**군산대학교 해양건설공학과, (주)더해본(Corresponding author: SeungWon Suh, Department of Coastal Construction Engineering, Kunsan National University, 558 Daehak-ro, Kunsan, Jeonbuk 54150, Korea, Tel: +82-63-469-1713, Fax:+82-63-469-1861, suh@kunsan.ac.kr; CEO, The sea-born eXperts, 558 Daehak-ro, Kunsan, Jeonbuk 54150, Korea)

1. 서 론

최근 발생한 태풍 중 2012년 덴빈(Tembin), 볼라벤(Bolaven), 산바(Sanba) 등이 우리나라 서남해안을 상륙하면서 해일 범람을 발생시켰으며, 2016년 태풍 차바(Chaba)와 2018년 발생한 태풍 콩레이(Kongrey)가 남해안으로 상륙하면서 부산 마린시티에 월파 범람을 야기하여 일대가 침수되는 피해가 발생하였다. 국외에서는 2005년 발생한 허리케인 카트리나(Katrina)가 미국 동부 연안을 상륙하면서 피해가 발생하였고, 2013년 발생한 태풍 하이옌(Haiyan)과 2018년 망쿳(Mangkhut)이 필리핀으로 상륙하여 해일 범람에 의한 피해가 발생하였다. 이러한 태풍 및 허리케인은 폭풍해일 대비의 중요성을 반복해서 상기시켜 준다. 특히 태풍 하이옌은 북서 태평양에서 발생되어 필리핀 동부에 위치한 Samar 지역으로 이동하였으며, 1분 평균 풍속이 315 km/h로 매우 강한 풍속을 유지한 채 상륙한 태풍으로 기록되었다(Wikipedia, 2019). Kossin et al.(2014)에 의하면 지난 1982년부터 2012년까지 31년 동안 전 세계에서 발생한 태풍과 허리케인, 사이클론 등과 같은 열대성 저기압이 가장 강하게 발달하는 지점이 지구의 적도에서 점점 멀어져 극 쪽인 고위도 지역으로 이동하는 것을 제시하였다. 이러한 환경 변화는 장래에 폭풍의 규모와 강도가 증가할 수 있기 때문에 중위도 지역에 위치한 우리나라의 경우 더 큰 연안재해가 발생할 수 있다.

미래에 발생할 수 있는 해수면 상승과 태풍의 강도 증가에 따라 연안에서의 재해 발생 가능성이 증가될 수 있다. Needham et al.(2012)은 과거에 발생한 폭풍 해일고 관측 자료에 근거하여 미국 걸프만 연안(Gulf coast)의 빈도 해일고를 분석하였다. 해일고 분석에는 확률밀도함수를 이용해 빈도 해일고를 제시하였으며, 적용 방법에 따라 빈도 해일고가 달라질 수 있음을 제시하였다. Suzuki et al.(2014)은 이산화탄소 증가에 따른 태풍 중심기압 변화에 대한 연구결과를 제시하였다. Lin et al.(2010)은 확률론적 합성태풍을 이용해 해일을 재현하고, 미래에 뉴욕에서 발생할 수 있는 극치 해일고를 제시하였다. 이와 같이 다수의 연구들은 과거의 불충분한 자료를 극복하고, 미래에 발생 가능한 태풍과 연안에서 발생할 수 있는 빈도 해일고에 관심을 고조시키고 있다. 국내 연구(Suh et al., 2009; Kim et al., 2019)에서는 과거 관측된 해일고를 이용해 우리나라 주요 조위관측소 위치에서의 빈도 해일고를 산정하였다. 그러나 실제 태풍 발생 시 관측된 자료가 계속 장비의 오작동으로 인해 결측되었거나 역사태풍 속성, 기상, 조위 등의 자료가 불충분하기 때문에 이를 극복할 수 있는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 과거에 발생한 역사태풍의 수가 적기 때문에 통계 자료에 근거한 확률론적 합성태풍을 생성하였다. 특히 합성태풍의 이동 경로를 실제 발생한 태풍과 유사하게 모사하기 위해 노력하였고, 태풍의 중심기압과 최대 풍속, 최대 풍속 반경 등의 속성을 반영하기 위해 관측 자료로부터 상관

관계를 도출하였다. 자동화 스크립트를 이용해 수십만 개의 합성태풍을 조석과 함께 고려하여 서남해안의 해일고를 산정하고, 확률밀도함수를 이용해 극치 해일고를 분석하였다.

2. 역사태풍 분석

2.1 Best track 분석

Best track은 대표적으로 하와이에 위치한 미 공군과 해군의 합동 태풍경보센터(JTWC: Joint Typhoon Warning Center)와 일본 도쿄에 위치한 지역특별기상센터(RSMC: Regional Specialized Meteorological Center)에서 제공하고 있다. RSMC는 10분 평균된 풍속, 풍속별 장·단축 반경 등에 관한 정보가 제공되며, JTWC는 1분 평균된 풍속, 풍속별 NE, SE, SW, NW 4분면에 대한 정보가 제공된다. JTWC는 34 kt, 50 kt, 64 kt 각 풍속별 4분면에 대한 풍속반경을 제공하고 있어 태풍의 형상을 비대칭 형태로 모사할 수 있기 때문에 실제 자연현상에서 발생하는 태풍 형상에 보다 근접하게 재현할 수 있다. Suh and Kim(2012)은 비대칭 정도풍이 고려된 해일고가 국부적으로 증가될 수 있는 가능성을 제시한 바 있다. 그러나 비대칭 형태로 태풍을 모사할 수 있는 정보는 2001년부터 제공하고 있기 때문에 누적된 태풍 자료가 불충분하여 태풍 속성을 분석하는 것이 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 4분면에 대한 풍속 반경 특성을 분석하지 않고, JTWC의 태풍 중심기압과 최대풍속, 최대풍속 반경 등의 태풍 속성을 분석하였다.

2.2 최대풍속 및 최대풍속 반경

기존 연구(Vickery et al., 2000; Willoughby et al., 2006)에서는 최대풍속 반경이 최대풍속과 사이클론의 중심위치의 위도와 상관관계가 있는 것으로 제시한 바 있다. Kim and Suh(2016)는 북서태평양에서 발생한 태풍을 분석하기 위해 JTWC에서 제공하는 1951~2015년 기간에 발생한 태풍의 best track을 분석하였으며, 기존 연구자들이 제시한 최대풍속(V_{max}) 및 최대풍속 반경(R_{max})과 태풍 중심기압(ψ)의 상관관계식과 비교하였다. Willoughby et al.(2006)과 Vickery and Wadhera(2009)가 제시한 최대풍속 반경 산정식(식 1~2)에 JTWC의 best track 최대풍속 반경과 태풍 중심 위치의 위도, Δp 등을 대입한 결과를 Fig. 1에 제시하였다. 태풍 중심 위치의 위도에 따른 변동성이 고려되어 본 연구에서 제시한 지수회귀선 인근에 최대풍속 반경이 분포되는 것으로 나타났다. Willoughby et al.(2006)이 제안한 최대풍속 반경은 대부분 지수 회귀선 아래에 분포되어 나타난다. Vickery and Wadhera(2009)의 최대풍속 반경은 약 980 hPa 기준으로 기압이 낮아질수록 지수회귀선을 상회하여 나타나며, 기압이 증가할 때는 반대 경향으로 나타난다. 실제 발생한 태풍 볼라벤(TY1215), 매미(TY0314), 곤파스(TY1007), 산바(TY1216) 등의 중심기압이 940~980 hPa 구간일 때 최대풍속 반경 분포가 지수 회

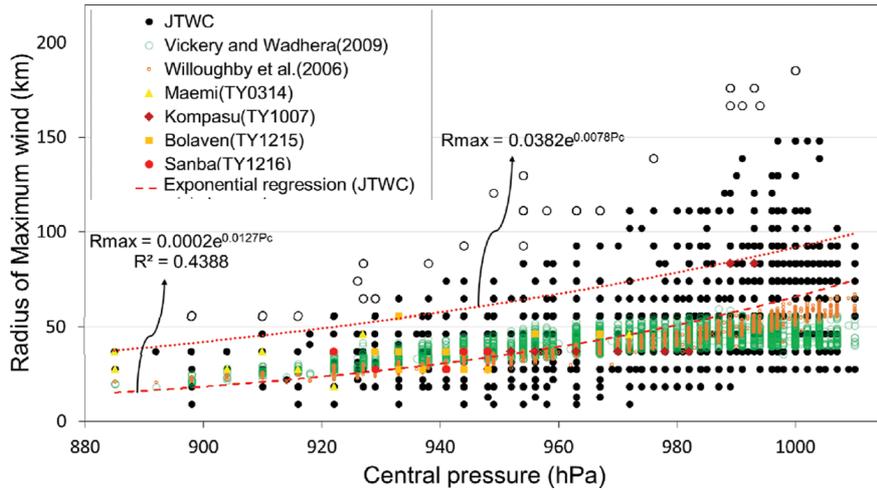


Fig. 1. Comparison of historical typhoon characteristics with corresponding values suggested by relevant studies for R_{max} vs P_c .

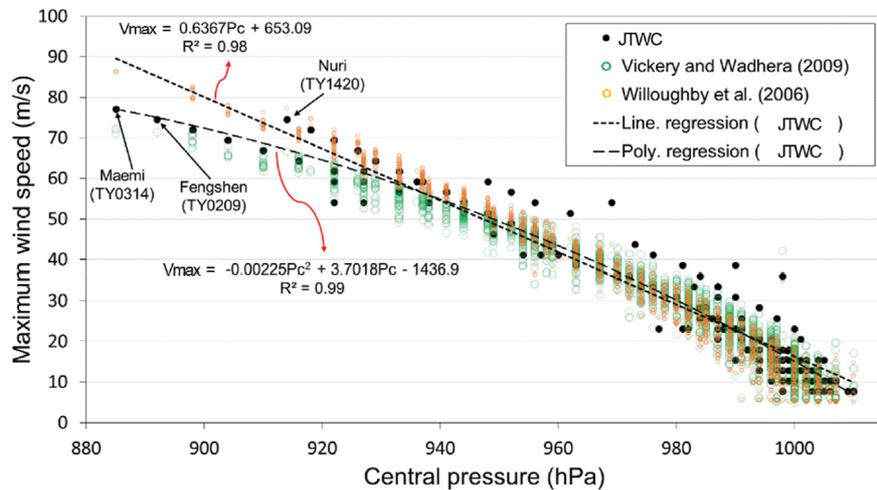


Fig. 2. Comparison of historical typhoon characteristics with corresponding values suggested by relevant studies for V_{max} vs P_c .

귀선에 대부분 5 km 내외에서 일치하는 것으로 나타난다.

$$R_{max} = 46.4 \exp(-0.0155V_{max} + 0.0169\psi) \quad (1)$$

$$R_{max} = \exp(3.015 - 6.291 \times 10^{-5} \Delta p^2 + 0.337\psi) \quad (2)$$

여기서, Δp 는 태풍 중심기압과 주변기압의 차이, V_{max} 는 최대풍속, ψ 는 태풍 중심 위치이다. 최대풍속과 중심기압의 상관관계는 Fig. 2에 제시하였으며, 중심기압이 높을수록 최대풍속이 감소하는 역상관관계로 나타난다. 본 연구에서 제시한 2차 다항식 회귀선과 Vickery and Wadhra(2009)가 제시한 식에 의해 산정된 중심기압에 따른 최대풍속 경향이 유사하게 나타난다.

3. 합성태풍 생성

3.1 확률론적 합성태풍 생성

호주 지형연구원(GA: Geoscience Australia)에서 개발한

TCRM(Tropical Cyclone Risk Model)은 열대 저기압(tropical cyclone)에 의해 발생할 수 있는 기압과 풍속에 대한 취약성을 분석할 수 있으며, 역사태풍 속성 정보로부터 확률밀도함수를 추정하고 풍속에 대한 빈도 해석을 수행할 수 있다. TCRM은 자료처리 모듈, 통계 모듈, 이동 경로 생성 모듈, 바람장 모듈 그리고 위험성 모듈로 구성되며, 처리 과정은 Python code로 자동화 되어 있다. 태풍의 이동경로를 생성하는 모듈은 Hall and Jewson(2007)이 제시한 방법이 적용되어 있으며, 역사태풍의 이동경로를 정규분포로 추정하여 확률적으로 태풍의 이동 경로를 생성하게 된다. 중심기압에 대해서는 커널밀도추정(Kernel density estimation)를 이용해 분석하고, 확률적으로 중심기압을 생성하게 된다. 이와 같은 방법을 통해 통계 모듈에서는 과거 발생한 태풍의 이동경로와 중심기압의 속성에 대한 확률밀도함수의 모수를 추정하고, Monte-Carlo 방법으로 확률론적 합성태풍을 생성하게 된다. 이러한 방법으로 생성된 합성태풍은 과거 관측된 자료로부터 매우 높은 상관성을 유지할 수 있다.

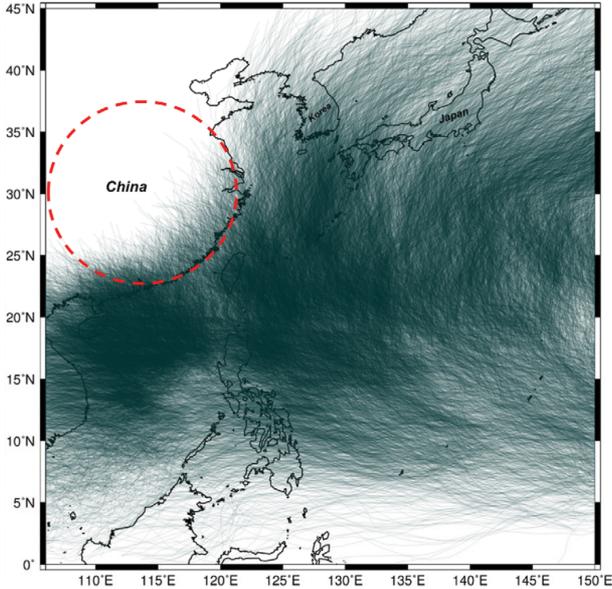


Fig. 3. Synthesized typhoon tracks.

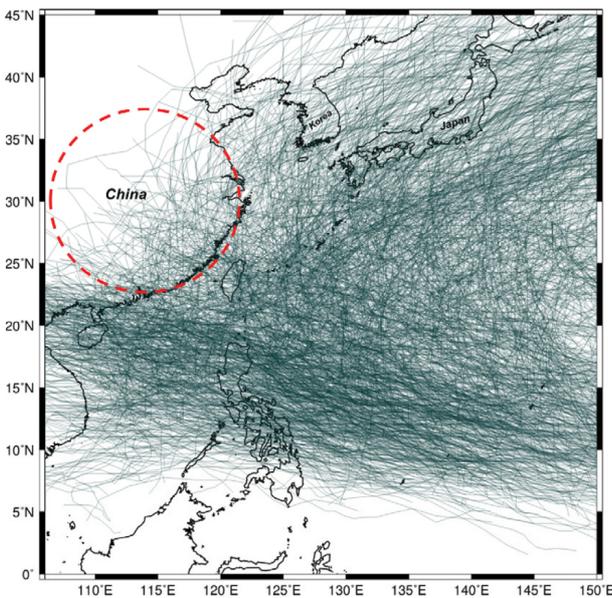


Fig. 4. Historical typhoon tracks.

본 연구에서는 TCRM을 이용해 태풍의 이동경로와 중심기압이 고려된 174,689개의 합성태풍을 생성하였다. 또한 앞 절에서 분석한 중심기압과 최대풍속, 최대풍속 반경 등이 생성된 태풍의 중심기압으로부터 산정된다. Kang et al.(2016)은 서해안에 영향을 미친 태풍 속성 자료를 이용해 최대 풍속에 대한 빈도를 산정하였으며, 이와 일치하는 해일을 모의하기 위해 블라벤과 같은 이동경로를 갖는 표준태풍을 선정하였다. 그러나 역사태풍의 이동경로와 내습각도는 매우 다양하게 나타나고, 태풍 속성이 동일하더라도 연안에서 발생하는 해일은 내습각도와 이동경로에 따라 다르게 나타난다. 이러한 제한사항을 극복하기 위해 역사태풍에 근거하여 확률적으로 태풍 이동경로와 속성이 고려된 합성태풍을 생성한 연

구가 국내외에서 최초로 시도되었다. 생성한 합성태풍 이동경로와 RSMC best track 이동경로는 Fig. 3과 Fig. 4에 제시하였다. 실제 역사태풍 이동경로는 중국 남동부 연안에 상륙하여 소멸되거나 황해로 재부상하여 우리나라로 이동하는 특성을 보인다. 그러나 중국 남동부 연안에 상륙한 합성태풍이 전부 소멸하는 것으로 나타나는 문제점이 있다. 다음 절에서는 이러한 문제점을 극복하기 위한 내용을 다룬다.

3.2 합성태풍 이동경로 개선

서남해안에 영향을 준 역사태풍 중 중국 동부 연안을 상륙하여 서해안으로 통과한 역사태풍은 7.2%로 나타나며, 합성태풍은 0.4%에 불과한 것으로 나타난다. 또한 류큐열도를 통해 이동한 태풍이 황해를 가로질러 서해안으로 통과한 태풍이 역사태풍은 15.8%, 합성태풍은 11.4%로 다소 적게 나타난다. 남해안으로 통과한 역사태풍은 26.3%, 합성태풍은 44.1%로 과하게 통과하는 경향을 보인다. 따라서 태풍 통과량이 개선될 필요성이 있다. Vickery and Twisdale(1995)는 미국 플로리다 주를 통과한 9개의 관측된 허리케인 자료를 이용해 감쇠 매개 변수를 분석하였으며, 이러한 감쇠 매개 변수가 TCRM에 고려되어 있다. 그러나 본 연구에서 생성한 합성태풍의 대부분은 중국 남동부 연안으로 상륙하여 재부상(resurface) 하지 않고 소멸(decay)되는 것으로 나타난다. 태풍이 연안으로 상륙하게 되면 중심기압이 다음 식(3)과 같이 지수함수 적으로 감소하여 태풍의 잠재력이 상실된다.

$$\Delta p(t) = \Delta p_0 \exp(-at) \quad (3)$$

여기서, $\Delta p(t)$ 는 태풍이 상륙한 후 시간에 따라 변화되는 태풍 중심기압과 주변기압의 차이, Δp_0 는 태풍이 상륙하기 이전의 기압 차이, a 는 감쇠 매개 변수, t 는 시간을 의미한다. 식(3)에 의한 중심기압 감소는 감쇠 매개 변수에 매우 민감하며, 미국 연안에서 산정한 감쇠 매개변수는 육상고도와 해안선 상태 등과 같은 지질학적 영향이 고려되어 산정되었기 때문에 다른 지역에 확장하여 적용하는 것은 곤란하다. Fig. 5에 제시한 바와 같이 역사태풍은 우리나라 연안을 다양한 경로로 이동한다. 대부분의 이동경로는 류큐열도를 관통하는 것으로 나타난다. 그러나 일부 이동경로는 중국 해안을 상륙하여 소멸되거나 황해로 재부상한 후 서남해안에 영향을 준다. 이러한 태풍 이동경로 특성이 합성태풍 이동경로에 적용되어야 한다.

TCRM을 이용해 생성한 합성태풍 중 중국 해안으로 상륙한 태풍은 중심기압이 급격하게 감쇠되어 소멸되는 비현실적인 태풍이 Fig. 3과 같이 나타난다. 그러나 역사태풍 중 중국 해안으로 상륙한 태풍은 소멸되거나 재부상하여 서남해안으로 이동하는 특징을 보인다. 기존 연구(Vickery and Twisdale, 1995; Vickery, 2005; Vickery et al., 2009; Xiao, et al., 2011; Zhao et al., 2013)에 따르면 중심기압은 해수면 위에서 증가할 수 있으며, 상륙 후 해수면 위로 이동하면서 시간과 거리

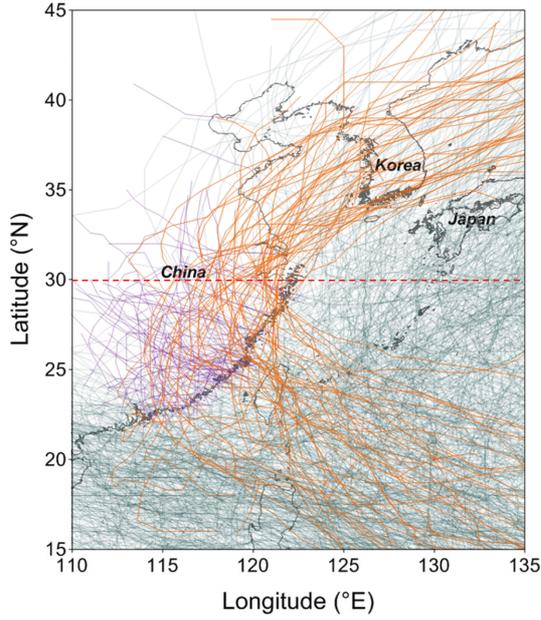


Fig. 5. Historical typhoon tracks through southeast China from 1951 to 2016: purple indicates decayed storms and brown indicates resurfaced storms that affected the Korean peninsula.

에 따라 회복될 수 있다. 따라서 실제 발생된 태풍처럼 합성 태풍을 생성하여 발생하는 해일고를 분석하기 위해서는 태풍이 상륙한 후 재부상하는 효과를 고려하는 것이 필요하다. 태풍의 약 30%는 중국 동남 해안에 상륙하여 황해로 재부상한 후 서해연안에 영향을 미치는 것으로 나타난다. 또한 태풍의 이동경로가 중위도에서 온대 저기압화(Bruneau et al., 2017; Jones et al., 2003)에 의해 변환되는 북위 30도에서 위도에 따라 달라지는 적절한 확률밀도함수를 산정하여 TCRM에 적용하였다. 본 연구에서는 RSMC에서 관측된 1951~2016년 기간 동안 중국 동부 연안으로 상륙한 233개의 태풍 이동경로에 대해 분석하였다. 태풍 이동경로 중 114개는 서쪽으로 이동하여 중국 동남 측 연안에서 소멸되고, 119개는 황해로 이동하여 재부상 된다. 이러한 태풍의 이동 특성을 고려

Table 1. Probability distribution function parameter of decayed and resurfaced tracks

Type	Shape; ξ	Scale; σ	Location; μ
Gumbel (Decayed typhoons)		-32.03	59.60
Weibull (Resurfaced typhoons)	-0.61	35.77	37.90

하기 위해 extRemes(Gilleland and Kakz, 2016)의 R-package를 이용하여 태풍의 이동 각도에 따른 확률밀도함수를 추정하였다. 일반화된 극치분포(GEV: Generalized Extreme Value)가 가장 적합한 것으로 추정되었으며, 확률밀도함수는 식(4)와 같다. 태풍 소멸은 Gumbel 분포로 나타나고 재부상은 Weibull 분포를 따르는 것으로 Fig. 6과 같이 나타나며, 추정된 모수는 Table 1에 제시하였다.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \begin{cases} \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{\left(\frac{-1}{\xi} \right) - 1} \exp \left[- \left\{ 1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right\}^{\frac{-1}{\xi}} \right] & \xi \neq 0 \\ \exp \left(- \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \exp \left[- \exp \left(- \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right] & \xi = 0 \end{cases} \quad (4)$$

여기서, μ 는 위치 모수(location parameter), σ 는 규모 모수(scale parameter), ξ 는 형상 모수(shape parameter)이다.

합성태풍을 생성할 때 가장 적합한 확률밀도함수를 선정하기 위해 역사태풍 이동경로를 분석하였다. Fig. 7(b)과 같이 위도와 경도를 각 5도 간격 설정하여 RSMC best track 자료를 구역별로 확률밀도함수를 추정하였으며, 태풍 이동 각도에 대한 모수를 Table 2에 제시하였다. 분석한 확률밀도함수와 추정된 모수를 TCRM의 Python code에 반영하였다. 합성태풍을 생성한 결과 Fig. 7(b)과 같이 중국 남동부 연안에서 태풍이 소멸되거나 재부상하는 것으로 나타난다.

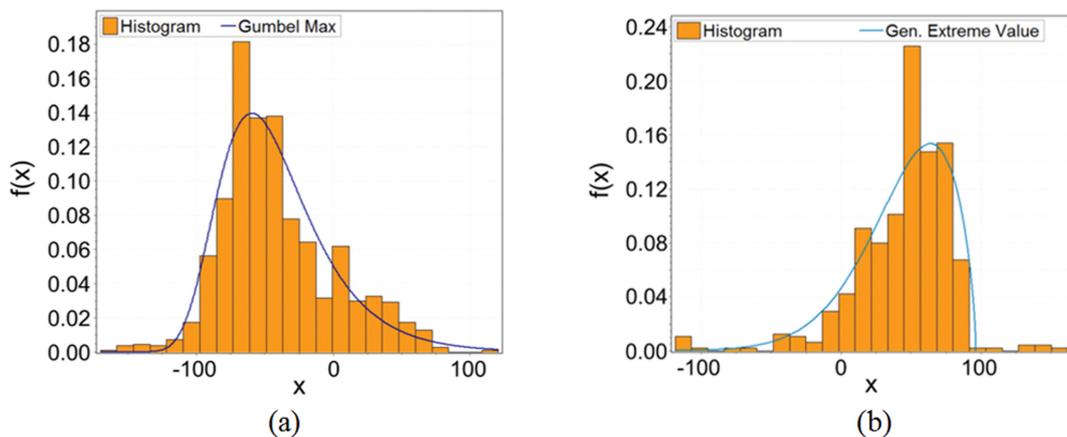


Fig. 6. Fitted probability density functions of heading directions for typhoons that landed on southeast China and: (a) decayed on land or (b) resurfaced over Yellow sea (0°: north; negative: west; positive: east).

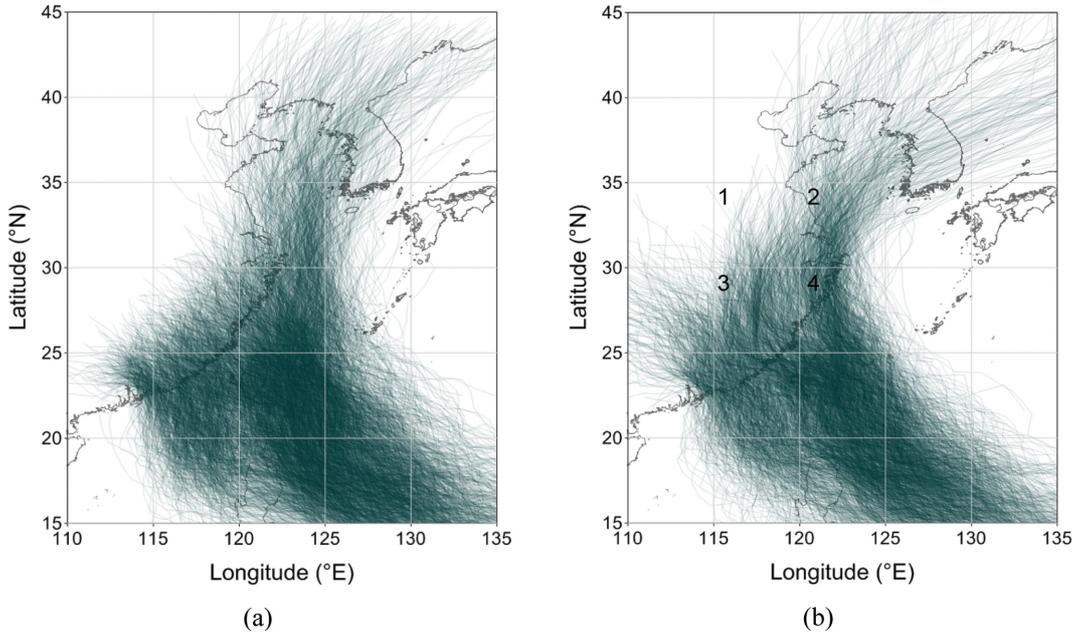


Fig. 7. Synthesized typhoon tracks affecting Korean coasts after landing on southeast China: (a) without and (b) with improvement.

Table 2. Probability density functions parameters of typhoon headings, in degrees, based on historical tracks shown in the southeast China zones in Fig. 7(b)

Zone	Type	Shape; ξ	Scale; σ	Location; μ
1	GEV (Weibull)	-0.56	38.42	12.49
2		-0.66	36.03	25.36
3		-0.33	43.62	-24.07
4		-0.10	31.19	-34.62

3.3 합성태풍 속성 분석

3.3.1 중심기압

우리나라 서남해안에 직·간접적으로 영향을 미친 태풍을 대상으로 중심기압을 분석하였다. 위도에 따른 역사태풍과 합성태풍의 중심기압을 Fig. 8에서 살펴보면 역사태풍의 최저기압은 885 hPa, 합성태풍은 888 hPa로 나타나고, 평균은 역

사태풍과 합성태풍에서 975 hPa로 동일하게 나타난다. 그러나 서남해안에 영향을 미치는 태풍의 중심 위치는 북위 25~40도 구간이다. Fig. 8에 점선으로 표시된 구간의 합성태풍에서 관측 자료로부터 설명되지 않는 중심기압이 나타나며, 불충분한 관측 자료가 이론적 확률분포함수에 적용되어 나타나는 것으로 추정된다. 그러나 태풍 중심기압 평균은 합성태풍과 best track에서 동일하게 나타나고 표준편차는 합성태풍에서 20.4 hPa, best track은 22.9 hPa로 유사하게 나타난다. RSMC best track과 합성태풍의 이동경로를 살펴본 결과 Fig. 9와 같이 나타나며, 역사태풍의 이동경로는 합성태풍에 비해 국부적으로 무작위성을 보인다.

3.3.2 이동경로

북서태평양에서 발달한 태풍은 황해 및 남해를 통과하여 서

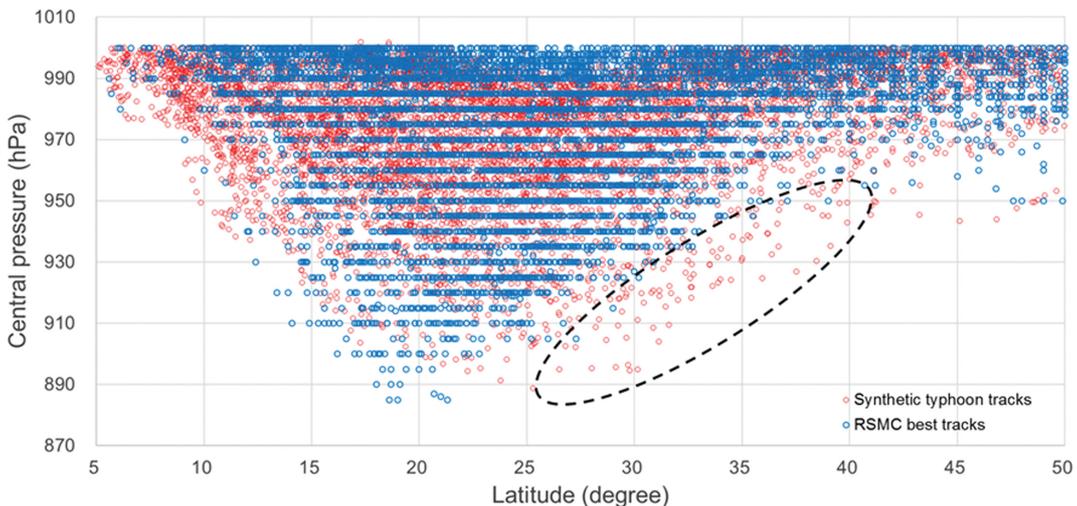


Fig. 8. Comparison of central pressure of synthetic typhoon tracks and historical tracks.

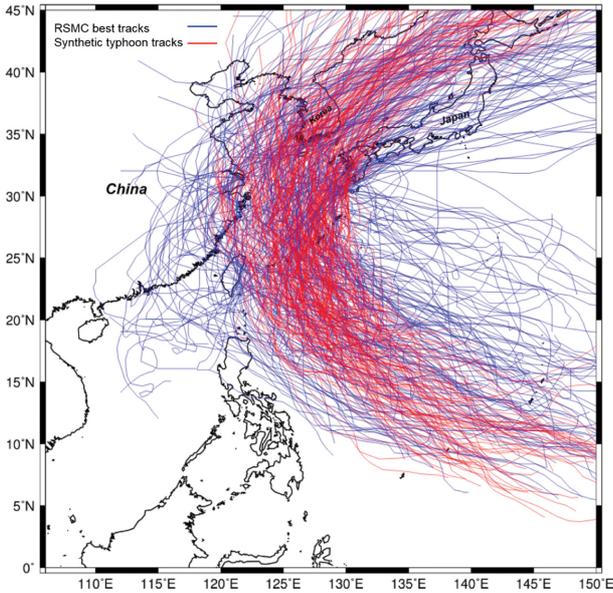


Fig. 9. Historical tracks and generated synthetic typhoon tracks affecting the southwest coast.

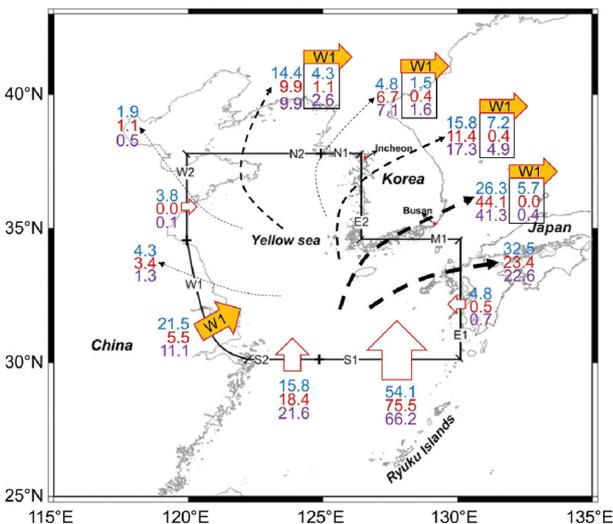


Fig. 10. Typhoon headings affecting or predicted to affect the Korean peninsula: blue, brown, and purple indicate historical, synthetic tracks generated by the previous study, and synthetic tracks generated by this study, respectively. Storm tracks incoming via W1 (from southeast China) diverge into four directions.

남해안에 직·간접으로 영향을 주기 때문에 이러한 태풍 이동 경로를 분석할 수 있도록 Fig. 10과 같은 경계를 설정하였다. RSMC에서 제공하는 1951~2016년 기간의 역사태풍 이동 경로와 기존 TCRM을 통해 생성한 합성태풍 이동경로, 그리고 앞 절에서 개선된 온대 저기압화 및 중심기압 감소 효과가 고려된 이동경로를 Fig. 10에 제시하였다. 역사태풍 이동경로를 살펴보면 태풍은 주로 류큐열도를 지나 S1으로 54.1%, S2는 15.8%, W1은 21.5%가 통과하여 대부분 우리나라 서해안 경계 E2로 15.8%, 남해안 경계 M1로 26.3%, 일본 서쪽 연안

E1로 32.5% 경계로 통과한다. 전체 태풍 통과율을 살펴보면 S1, S2, W1 경계로 91.4%가 통과되어 74.6%가 E1, E2, M1으로 통과되는 것으로 나타난다. 특히 중국 동남부 연안으로 상륙한 태풍이 W1 경계로 21.5% 통과하여 황해로 재부상하는 것으로 나타나고, N1, N2, E2, M1 경계로 18.7%가 통과하는 특징을 보인다. 개선 전·후 합성태풍 이동경로를 Fig. 7에 제시하였다. 통과율을 살펴보면 W1 경계로 관측은 21.5%, 개선 전은 5.5%, 개선 후는 11.1%로 나타나며, E2 경계는 각각 7.2%, 0.4%, 4.9%, N2는 각각 4.3%, 1.1%, 2.6%, N1은 1.5%, 0.4%, 1.6%로 나타나 온대 저기압화 및 중심기압 감소 효과를 개선함으로써 전반적인 태풍 통과율이 개선된 것으로 나타난다.

4. 빈도 해일고 산정

4.1 수치모의 체계

Suh and Kim(2011)은 국부절단오차(LTEA)가 응용된 기법(Hagen et al., 2000; McDonald, 2006)을 이용해 수심에 따라 절점 밀집도가 달라지는 유한요소 격자체계를 태풍의 이동경로가 충분히 포함시킬 수 있도록 하여 NWP-G57k를 생성한 바 있다. 격자체계는 총 56,617개의 절점과 104,094개의 유한요소로 구성된다. 적용된 수심은 KorBathy30s와 ETOPO1이 적용되었고, 개방경계는 FES2004(Lyard et al., 2006)로부터 추출한 M₂, S₂, K₁, O₁, N₂, K₂, P₁, Q₁ 등 총 8개 분조가 고려된다. 우리나라 연안 96개 관측소와 국제수로기구 153개 관측소의 조석 진폭과 위상을 계산치와 비교한 결과 진폭 RMS 오차가 0.138 m, 위상은 14.80 degree로 나타난다. 이외에도 ADCIRC(Luetlich et al., 1992) 모형을 적용한 연구(Suh et al., 2015; Fleming et al., 2008; Blanton et al., 2012)가 수행되었고, 태풍과 허리케인 재현 및 예측에 대한 연구 결과에서 우수한 신뢰성을 제시하고 있다. 본 연구에서는 기존 연구(Suh and Kim, 2011; Suh et al., 2015)에서 제시한 조석, 폭풍해일 모의 신뢰성이 검증된 NWP-G57k 격자체계를 이용해 조석과 합성태풍에 의한 해일고를 산정하였다.

4.2 합성태풍 적용성 평가

본 절에서는 금번 연구에서 생성한 합성태풍과 실제 자연 현상에서 발생한 태풍에 의한 해일이 유사하게 나타나는지 살펴보고자 하였다. 대표적으로 서남해안에 큰 피해를 발생시킨 볼라벤과 매미를 선정하였으며, 역사태풍과 이동경로가 유사한 합성태풍을 Fig. 11과 같이 각각 5개를 선정하였다. 태풍 볼라벤이 경기만으로 상륙하기 전 중심기압, 최대풍속 반경, 최대풍속은 각각 960 hPa, 39 km, 45 m/s로 나타나고, 합성태풍은 각각 952~975 hPa, 36~48 km, 34~48 m/s로 나타난다. 태풍 매미가 남해안에 상륙하기 전 태풍 속성은 각각 950 hPa, 19 km, 50 m/s로 나타나고, 합성태풍은 각각 929~967 hPa, 27~42 km, 40~60 m/s로 나타난다. 역사태풍과 합성

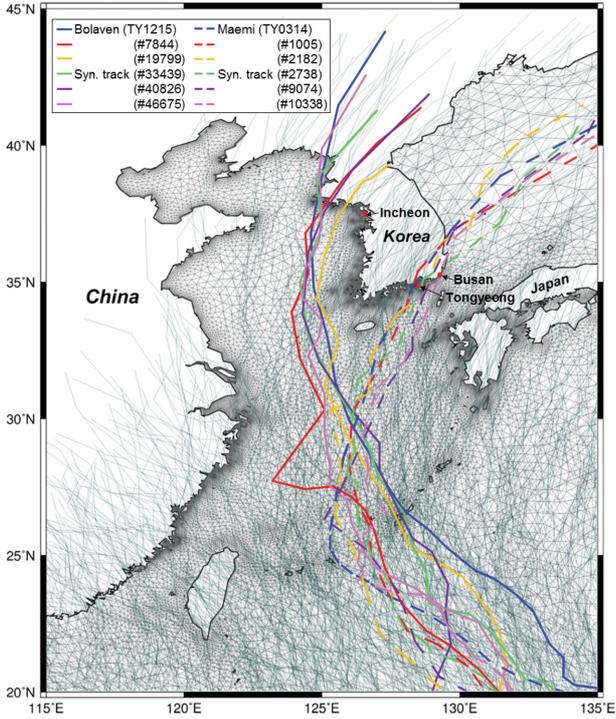


Fig. 11. Comparisons of generated storm tracks with historical typhoons: Bolaven and Maemi, where synthesized storm numbers with corresponding values are represented by different colors.

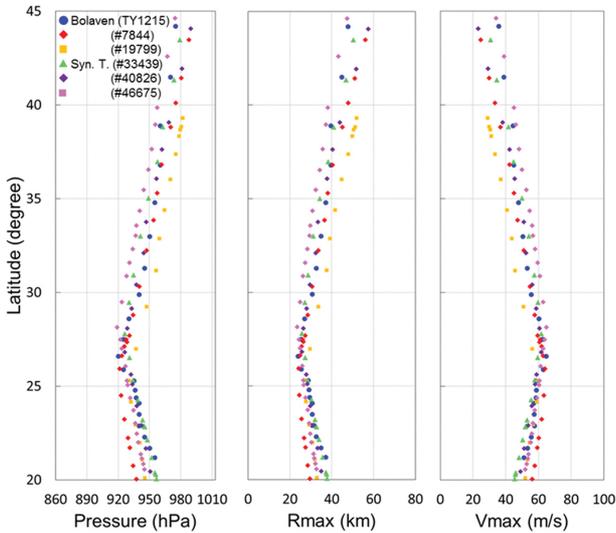


Fig. 12. Comparison of characteristics of typhoons landed on the West coast.

태풍의 속성이 유사한 것으로 나타난다. 합성태풍과 역사태풍 수치모의의 시 조석과 해일을 함께 고려하였다. 볼라벤에 의해 관측된 해일고는 인천에서 1.68 m로 나타났으며, 합성태풍에 의한 해일고는 1.1~1.57 m로 나타나고, 매미에 의한 관측된 해일고는 0.99 m, 합성태풍은 0.61~0.97 m로 나타난다. 역사태풍과 합성태풍의 중심기압, 최대풍속, 최대풍속 반경의 속성은 Fig. 12~13에 제시하였고, 관측된 해일과 합성태풍에 의한 해일은 Fig. 14~15에 제시하였다. 본 연구에서 생성한

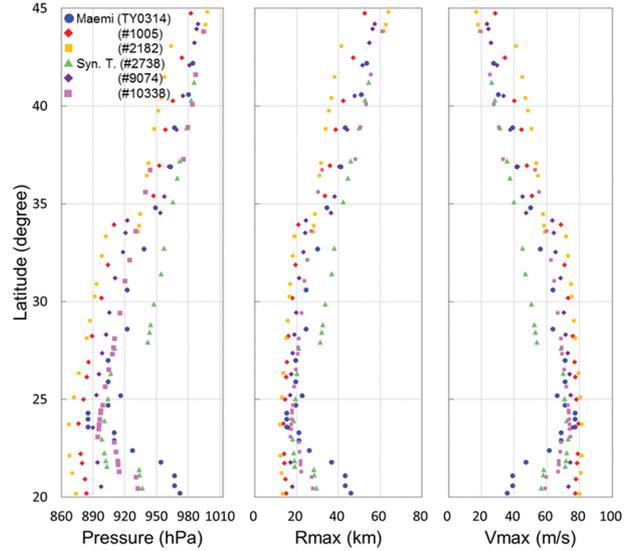


Fig. 13. Comparison of characteristics of typhoons landed on the South coast.

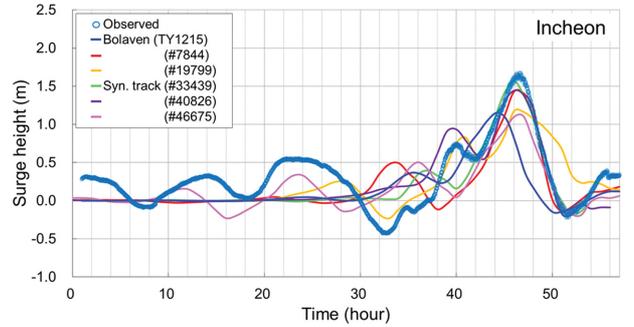


Fig. 14. Comparison of simulated surge with observed surge at Incheon.

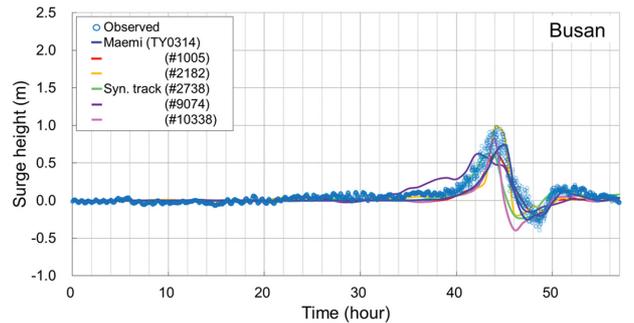


Fig. 15. Comparison of simulated surge with observed surge at Busan.

합성태풍의 속성이 과거에 발생한 태풍과 유사하게 나타나며, 수치 모의한 해일고도 유사한 범위로 나타나 합성태풍을 이용한 빈도 해일고를 산정하기 위해 적합한 것으로 판단된다.

4.3 Perl script를 이용한 해일고 산정

연안에 발생하는 조위와 조시는 무작위로 하여 조석상황을 발생시켰으며, hot start 조건으로 조석이 재현되는 상황에서 합성태풍을 각각 고려하여 해일을 재현하였다. 174,689개

Table 3. Comparison of surge height of observed and simulated

Station	Annual maximum surge height					
	Average (m)			Standard deviation (m)		
	Obs.	Cal.	Diff. (Cal. - Obs.)	Obs.	Cal.	Diff. (Cal. - Obs.)
Incheon	0.57	0.51	-0.06	0.23	0.43	0.20
Kunsan	0.48	0.48	0.00	0.16	0.42	0.26
Mokpo	0.51	0.52	0.01	0.13	0.38	0.25
Heuksando	0.37	0.20	-0.17	0.12	0.09	-0.03
Wando	0.52	0.44	-0.08	0.23	0.32	0.09
Yeosu	0.50	0.54	0.04	0.26	0.40	0.14
Tongyeong	0.40	0.44	0.04	0.26	0.33	0.07
Busan	0.31	0.29	-0.02	0.12	0.19	0.07
Seogwipo	0.42	0.26	-0.16	0.16	0.15	-0.01

의 합성태풍에 의한 해일고 수치모의 계산은 280 core와 infiniband로 구성된 Zero9을 사용하고, 자동으로 모형의 입력 자료를 갱신하고 수치모의 되도록 Perl script를 이용하여 자동화 하였다. 일련의 과정을 상세하게 살펴보면, ADCIRC 모형을 이용하여 대조기와 소조기를 포함하는 30일 기간 동안 cold start 조건으로 모의하여 1시간 간격으로 hot start 조건인 조위와 유속이 포함된 정보를 데이터베이스(DB: Data Base)화 하였다. 이후 확률적으로 발생시킨 합성태풍을 순차적으로 Holland(1980)가 제안한 식으로 바람장과 기압장을 생성하게 된다. 이때 조석의 발생 시간은 nodal factor에 의한 조석변화 영향이 가장 작은 시기인 2011년 8월로 적용하였고, 30일 기간 중 조석 발생 시간을 무작위로 선정하여 조석과 태풍이 고려된 해일을 모의한다. 대조차 환경을 갖는 서해안과 남해안에 영향을 주는 합성태풍에 의한 조석이 고려된 해일은 조석 성분을 제거하기 위해 동일 기간에 조석만 고려하여 조위편차를 산정하였다. 서남해안의 주요 조위관측소에서 산정된 해일고를 추출하여 빈도 해일고를 산정하는데 이용된다. 이와 같이 일련의 과정은 자동화 스크립트를 통해 처리된다. 한 개의 확률태풍을 모의하는 시간은 약 4분 내외이며, 174,689개의 합성태풍 중 서남해안에 직·간접으로 영향을 줄 수 있는 태풍을 자동으로 판단하여 모의하는데 소요되는 시간은 약 3일이다.

4.4 합성태풍 모의 결과

합성태풍의 발생 수는 총 174,689개이며, 우리나라 서남해안으로 상륙하여 영향을 미친 태풍은 총 6,170개로 나타난다. 이러한 합성태풍을 이용해 빈도 해일고를 산정한 사례로 Lin et al.(2010)은 확률론적 합성태풍 7,555개를 이용하여 극치 해일고를 산정한 바 있다. 앞 절에서 서술한 Perl script로 모든 과정이 자동화된 합성태풍 모의체계를 이용해 인천, 군산, 목포, 대흑산도, 완도, 여수, 통영, 부산, 서귀포 정점에서 모의된 합성태풍에 의한 최대 해일고를 산정하였다. 관측치 및 계산치에 대한 연 최대 해일고 평균과 표준편차를 계산하여 Table 3에 제시하였다. 대흑산도와 서귀포를 제외한 관측된 연 최대 해일고 평균은 0.31~0.57 m로 나타나며, 관측치는

0.29~0.54 m로 나타나 유사한 범위로 판단된다. 그러나 표준편차를 살펴보면 관측치에 비해 계산치가 0.07~0.20 m 크게 나타난다.

4.5 빈도 해일고 산정 및 비교 분석

우리나라 연안에서 발생 가능한 빈도 해일고를 산정하기 위한 연구 사례를 살펴보면, Suh et al.(2009)은 경험모의기법(EST: Empirical Simulation Technique), 연 최대치 시계열(AMS: Annual Maximum Series)과 부분시계열(POT: Peaks Over Threshold) 방법으로 산정된 해일고에 Generalized Pareto(GP) 분포를 적용한 바 있고, KORDI(2010)에서는 과거에 발생한 201개 태풍을 이용해 수치모델로 해일고를 재현하고 Weibull 분포를 적용하였다. 이와 같이 빈도 해일고를 산정하기 위해 분포의 적합도에 따라 극치 분포, GP 분포가 적용되고 있다. 본 연구에서는 빈도 해일고를 산정하기 위해 적합도가 뛰어난 일반화된 극치분포(GEV: Generalized Extreme Value)를 이용해 빈도 분석을 하였다. 확률분포 함수의 매개변수를 추정하는 방법은 확률가중 모멘트법(PWMM: Probability Weighted Moment Method), 최소자승법(LSM: Last Square Method), 최우도법(MLM: Maximum Likelihood Method) 등이 있다. Suh et al.(2009)에 의하면 모멘트법은 이상치가 있는 경우 변동성이 큰 단점이 있고, 확률가중 모멘트법의 경우 가장 큰 자료에 큰 가중치를 주기 때문에 재현기간이 큰 경우에 모멘트법이나 최우도법보다 지나치게 높은 극값을 산정하는 경우가 있기 때문에 최우도법을 사용한 바 있으며, 본 연구에서도 최우도법을 이용하였다.

합성태풍에 의한 빈도 해일고는 기존 연구(Suh et al., 2009; KORDI, 2010)와 금회 관측자료 분석을 통해 산정한 10, 20, 30, 50, 100년 빈도 해일고를 Table 4에 제시하였다. 본 연구에서 제시한 확률론적 합성태풍에 의한 빈도 해일고를 분석한 국내 사례가 없기 때문에 재현기간 동안에 발생할 태풍의 수를 구하여 Training Set을 기반으로 Training Set보다 큰 데이터베이스를 구성할 수 있는 경험모의기법을 이용하여 빈도 해일고를 산정한 결과(Suh et al., 2009)와 비교하였다. 서해안 인천, 군산, 목포의 합성태풍에 의한 빈도 해일고는

Table 4. Comparison of return periods surge height (unit: m)

Station	Synthesized typhoon					Suh et al. (2009)	KORDI (2010)	Historical typhoon
	Return period (yr)					100 ^a	100	100
	10	20	30	50	100			
Incheon	0.56	0.92	1.21	1.71	2.73	2.31	2.09	1.31
Kunsan	0.54	0.86	1.11	1.54	2.40	2.35	2.29	1.82
Mokpo	0.57	0.87	1.11	1.49	2.23	1.58	0.36	0.86
Heuksando	0.23	0.29	0.33	0.39	0.47	0.68	0.57	0.73
Wando	0.50	0.71	0.87	1.11	1.53	1.79	1.34	1.69
Yeosu	0.60	0.90	1.12	1.48	2.15	2.10	1.86	2.03
Tongyeong	0.49	0.71	0.88	1.14	1.62	3.20	2.25	0.96
Busan	0.33	0.48	0.59	0.76	1.06	1.98	1.54	0.70
Seogwipo	0.29	0.37	0.43	0.50	0.62	0.91	0.80	0.92

^aUsing the Empirical Simulation Technique (EST).

2.23~2.73 m로 나타나며, Suh et al.(2009)은 1.58~2.31 m로 제시되어 있어 상대적으로 높게 나타난다. 남해안에 위치한 완도와 여수는 유사하게 나타나며, 통영과 부산은 Suh et al. (2009)이 제시한 빈도 해일고가 각각 3.20 m, 1.98 m로 본 연구에서 제시한 1.62 m, 1.06 m보다 약 2배 높게 나타난다. 대흑산도와 서귀포의 빈도 해일고는 기존 연구 결과 및 관측된 빈도 해일고 보다 낮게 나타난다.

5. 토 의

연 최대 해일고의 평균을 관측치와 계산치를 비교한 결과 계산치가 대흑산도와 서귀포에서 0.16~0.17 m 작게 나타난다. 선행연구(Suh et al., 2015)에서 폭풍해일을 실시간으로 신속하게 예측하기 위한 목적으로 구축한 NWP-G57k의 격자 해상도가 서남해안에서 0.1~0.9 km인 반면에 대흑산도는 1.6 km, 서귀포는 4.9 km로 매우 성긴 격자로 되어있다. 따라서 관측된 평균 해일고보다 수치모의 결과가 과소평가된 것으로 판단되며, 섬 지역의 해안선이 적절하게 반영되지 못한 제한 사항이 있다. Suh et al.(2015)에 의하면 서해안으로 상륙한 태풍 볼라벤의 예정보 자료를 이용해 NWP-G57k와 NWP-G116k 격자 체계에서 각각 수치 모의하여 최대 해일고에 대한 RMS 오차를 산정한 바 있다. 수치 모의된 결과와 관측된 최대 해일고의 RMS 오차는 NWP-G57k에서 0.31 m, NWP-G116k에서 0.24 m로 제시된다. 아울러 NWP-G57k를 이용한 최대 해일고 결과가 대흑산도와 서귀포에서 관측치에 비해 각각 52.4%, 31.2% 낮게 나타난다. 10 m 이하 수심의 절점 밀도가 NWP-G57k에서 40.4%, NWP-G116k에서 47.2%로 구성되어 있고, 섬지역의 해안선이 NWP-G116k에 상세하게 반영되어 있기 때문에 전반적인 해일고 오차가 NWP-G57k에 비해 감소하는 것으로 판단된다. 따라서 해일고 재현의 정확도와 수치모의 계산시간의 효율성을 확보할 수 있는 격자 해상도가 고려되어야 한다.

합성태풍을 이용한 빈도 해일고 산정은 일반화된 극치분포를 적용하였으며, 빈도 해일고는 기존 연구와 비교 분석하였

다. 대흑산도와 서귀포의 100년 빈도 해일고가 기존 연구 및 관측된 것보다 작게 나타나는데 전술하였듯이 격자 해상도 문제로 판단되며, 해일고의 평균이 낮아지면서 누적분포함수의 위치 모수가 작아지게 되고 이로 인해 빈도 해일고가 낮게 산정된 것으로 판단된다. 기존연구(Suh et al., 2009)에서 경험 모의기법으로 산정하여 제시한 부산, 통영의 100년 빈도 해일고는 각각 1.98 m, 3.20 m로 나타나 합성태풍에 의한 빈도 해일고보다 2배 크게 나타난다. Suh et al.(2009)에 의하면 경험모의기법은 연 최대치 시계열 방법보다 큰 폭풍해일고가 더 많기 때문에 경험적 산정식으로 구한 누적분포함수의 꼬리 부분이 두꺼워지며, 경험모의기법에 사용되는 자료의 기간이 불충분함에 따라 큰 폭풍해일고가 있는 경우 과대 산정될 수 있는 것으로 제시한 바 있다. 따라서 경험모의기법으로 산정한 빈도 해일고가 조위 관측소의 관측자료 상태에 따라 과대 산정될 수 있다. 또한 관측된 빈도 해일고는 각각 0.70 m, 0.96 m로 나타나기 때문에 기존 연구의 빈도 해일고가 과대평가된 것으로 추정된다.

Kang and Kim(2019)에 의하면 서해안 지역에서는 수심이 얕고 조석이 지배적이어서 조석과 해일간 비선형성에 의해 저조시 최대해일고가 나타나는 조석변조해일의 빈도가 높은 것으로 제시하였다. 아울러 Kang and Kim(2019)의 연구에서는 중국의 Zhe-Min 해역에서 저조시 30% 정도 해일고가 크게 나타나는 반면 고조시에 15% 정도 해일고가 감소하는 것으로 제시한 바 있다. 그러나 본 연구에서는 폭풍해일 수치모의 시 조석과 해일의 발생시간을 무작위로 선정하였고, 그 결과 각각 합성태풍마다 발생하는 해일고의 시작과 조시가 다르게 나타난다. 이와 같은 결과는 실제 해일이 저조시 또는 고조시등 해상 상황에 따라 다르게 나타날 수 있음을 보여주고 있으며, 해일고 또한 무작위로 나타나 실제적인 해석에 기여도가 크다고 판단된다.

6. 결 론

우리나라 서남해안에 영향을 준 역사태풍의 수가 적기 때

문에 빈도 해일고를 분석하기 위해서는 합성태풍 생성이 필요하다. 본 연구에서는 TCRM을 이용해 역사태풍의 이동경로와 중심기압을 확률밀도함수로 추정하여 확률적으로 발생하는 합성태풍을 생성하였다. 역사태풍에서 중국 남동부 연안으로 상륙한 후 재부상 하거나 소멸되는 현상을 합성태풍에 고려하기 위해 온대 저기압화 효과가 나타나도록 확률밀도함수와 감쇠 매개변수를 적용하였다. 중국 남동부 연안을 통과하여 재부상 후 서해연안으로 통과하는 태풍이 재현되는 것을 확인하였다. 태풍 이동경로 통과율이 역사태풍에서 7.2%로 나타나며, 합성태풍은 개선 전 0.4%에서 4.9%로 개선되었다. 역사태풍의 중심기압에 따른 최대풍속과 최대풍속 반경에 대한 상관관계를 도출하여 합성태풍에 고려하였으며, 합성태풍에 의해 산정된 해일은 실제 관측된 해일과 유사하게 나타나 빈도 해일고 산정에 활용될 수 있는 것으로 사료된다. 합성태풍 생성, ADCIRC 모형을 이용한 수치계산, 해일고 분석까지 모든 과정을 스크립트를 사용하여 효율적인 해석 과정이 수행될 수 있다.

합성태풍을 이용한 빈도 해일고는 선행연구의 결과 및 관측된 빈도 해일고와 비교할 때 대륙산도와 서귀포에서 낮게 산정되었다. 선행연구(Suh et al., 2015)에서 폭풍해일을 실시간으로 신속하게 예측하기 위한 목적으로 구축한 NWP-G57k의 격자 해상도가 섬과 같은 해역에서 매우 성긴 격자로 반영되어 있기 때문에 해일을 잘 재현하지 못한 것으로 사료된다. 섬 지역의 해일고 재현성을 제고하기 위해서는 보다 상세한 격자 해상도가 필요하며, 수십만 개의 합성태풍을 수치모의 하는 계산 시간이 증가될 수 있다. 따라서 서남해안에 발생하는 해일 재현의 정확도를 제고하고 계산시간의 효율성을 확보하기 위해서는 적절한 격자 해상도가 고려되어야 한다.

본 연구에서 제안한 역사태풍에 근거하여 확률적으로 발생시킨 합성태풍과 무작위로 고려된 조석상황에 의해 다양한 해일고가 나타날 수 있으며, 이러한 해일고는 실제 자연현상에서 발생할 수 있다. 따라서 우리나라 서남해안에 신규로 축조되는 구조물 주변해역에서 발생할 수 있는 극치 해일고 또는 극치 해면고를 산정하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2017R1A2B4008613).

References

Blanton, B., McGee, J., Fleming, J., Kaiser, C., Kaiser, H., Lander, H., Luettich, R.A., Dresback, K. and Kolar, R. (2012). Urgent computing of storm surge for North Carolina's coast. *Procedia Comput. Sci.*, 9, 1677-1686.

Bruneau, N., Grieser, J., Loridan, T., Bellone, E. and Khare, S. (2017). The impact of extra-tropical transitioning on storm surge and waves in catastrophe risk modelling: application to the Japanese coastline. *Natural Hazards*, 85(2), 649-667.

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. *Estuar. and Coast. Modeling*, 2007, 893-912.

Gilleland, E. and Katz, R.W. (2016). Extremes 2.0: an extreme value analysis package in R. *J. Stat. Softw.*, 72(8), 1-39.

Hagen, S.C., Westerink, J.J., Kolar, R.L. and Horstmann, O. (2000). Two-dimensional, unstructured mesh generation for tidal models. *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 35, 669-686.

Hall, T.M. and Jewson, S. (2007). Statistical modelling of North Atlantic tropical cyclone tracks. *Tellus A*, 59(4), 486-498.

Holland, G.J. (1980). An Analytical Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes. *Mon. Weather Rev.*, 108, 1212-1218.

Jones, S.C., Harr, P.A., Abraham, J., Bosart, L.F., Bowyer, P.J., Evans, J.L., Hanley, D.E., Hanstrum, B.N., Hart R.E., Lalaurette, F., Sinclair M.R., Smith R.K. and Thorncroft C. (2003). The extratropical transition of tropical cyclones: Forecast challenges, current understanding, and future directions. *Weather Forecast*, 18(6), 1052-1092.

Kang, J.W., Kim, Y.S., Kwon, S.D. and Choun, Y.S. (2016). Generation of a standard typhoon using for surge simulation consistent with wind in terms of return period. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(1), 53-62 (in Korean).

Kang, J.W. and Kim, Y.S. (2019). Typhoon-surge characteristics and the highest high water levels at the Western coast. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(2), 50-61 (in Korean).

Kim, H.J. and Suh, S.W. (2016). Probabilistic coastal storm surge analyses using synthesized tracks based on historical typhoon parameters. *J. Coast. Res.*, 75(sp1), 1132-1136.

Kim, T.J., Kwon, H.H. and Seok, S.Y. (2019). Frequency analysis of storm surge using Poisson-Generalized Pareto distribution. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, 52(3), 173-185 (in Korean).

KORDI (2010). Development of Storm Surge and Tsunami Prediction System and Estimation of Design Water Level for major ports in Korea. 362 (in Korean).

Kossin, J.P., Emanuel, K.A. and Vecchi, G.A. (2014). The Poleward Migration of the Location of Tropical Cyclone Maximum Intensity. *Nature*, 509, 349-252.

Lin, N., Emanuel, K.A., Smith, J.A. and Vanmarcke, E. (2010). Risk assessment of hurricane storm surge for New York City. *J. Geophys. Res.*, 115, D18121.

Luettich, R.A., Westerink, J.J. and Scheffner, N.W. (1992). ADCIRC : An Advanced Three-Dimensional Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries Report 1: Theory and Methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. Vicksburg, MS: US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Sta-

- tion, Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6, 141.
- Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T. and Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dyn.*, 56, 394-415.
- McDonald, C.L. (2006). Automatic, unstructured mesh generation for 2D, shelf-based tidal models. MS thesis, Brigham Young University.
- Needham, H.F., Keim, B.D., Sathiaraj, D. and Shafer, M. (2012). Storm surge return periods for the United States Gulf Coast. *Advances in Hurricane Engineering*, 715-740.
- Suh, K.D., Yang, Y.C., Jun, K.C. and Lee, D.Y. (2009). Extreme sea level analysis in coastal waters around Korean peninsula using empirical simulation technique. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 21(3), 254-265 (in Korean).
- Suh, S.W. and Kim, H.J. (2011). Precise tidal simulation on the Yellow sea and extended to north western pacific sea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 23(3), 205-214 (in Korean).
- Suh, S.W. and Kim, H.J. (2012). Typhoon surge simulation on the West coast incorporating asymmetric vortex and wave model on a fine finite element grid. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 24(3), 166-178 (in Korean).
- Suh, S.W., Lee, H.Y., Kim, H.J. and Fleming, J.G. (2015). An efficient early warning system for typhoon storm surge based on time-varying advisories by coupled ADCIRC and SWAN. *Ocean Dyn.*, 65(5), 617-646.
- Suzuki, T.S., Shibaki, H. and Suzuyama, K. (2014). Prediction of inundation disaster due to storm surge under global warming. *Proc. of 34th Conference on Coast. Engineering*, Seoul, Korea.
- Vickery, P.J. and Twisdale, L.A. (1995). Wind-field and filling models for hurricane wind-speed predictions. *J. Struct. Eng.*, 121(11), 1700-1709.
- Vickery, P.J., Skerlj, P.F. and Twisdale, L.A. (2000). Simulation of hurricane risk in the U.S. using empirical track model. *J. Struct. Eng.*, 126(10), 1222-1237.
- Vickery, P.J. (2005). Simple empirical models for estimating the increase in the central pressure of tropical cyclones after landfall along the coastline of the United States. *J. of Appl. Meteorology*, 44(12), 1807-1826.
- Vickery, P.J., Masters, F.J., Powell, M.D. and Wadhera, D. (2009). Hurricane hazard modeling: The past, present, and future. *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97(7), 392-405.
- Vickery, P.J. and Wadhera, D. (2009). Statistical models of Holland pressure profile parameter and radius to maximum winds of hurricanes from flight-level pressure and H*Wind data. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 47(10), 2497-2517.
- Wikipedia (2019). https://en.wikipedia.org/wiki/Typhoon_Haiyan (last date accessed: 16 Jun 2019).
- Willoughby, H.E., Darling, R.W.R. and Rahn, M.E. (2006). Parametric representation of the primary hurricane vortex. Part II: A new family of sectionally continuous profiles. *Mon. Weather Rev.*, 134(4), 1102-1120.
- Xiao, Y.F., Duan, Z.D., Xiao, Y.Q., Ou, J.P., Chang, L. and Li, Q.S. (2011). Typhoon wind hazard analysis for southeast China coastal regions. *Structural Saf.*, 33(4), 286-295.
- Zhao, H., Han, G., Zhang, S. and Wang, D. (2013). Two phytoplankton blooms near Luzon Strait generated by lingering Typhoon Parma. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 118(2), 412-421.

Received 31 July, 2019

Revised 3 September, 2019

Accepted 8 September, 2019