

국내 연안 태풍 해일의 결정론적 추정 및 침수 영역 예측 Deterministic Estimation of Typhoon-Induced Surges and Inundation on Korean Coastal Regions

구혜윤* · 맹준호* · 조광우**
 Hyeyun Ku*, Jun Ho Maeng* and Kwangwoo Cho**

요지 : 본 연구는 기후변화에 의한 해수면 상승 영향 예측의 첫 단계로서, SLOSH(Sea, Lake, Overland Surges from Hurricanes)를 우리나라 연안에 적용하여 태풍 해일고 예측의 한계를 제시하고, 이에 따라 발생 가능한 연안 침수를 예측하기 위하여 수행되었다. SLOSH의 국내 적용을 위하여 개발된 한반도 통합 격자망의 적용성 검증을 바탕으로 태풍 매미(0314)와 볼라벤(1215)에 의한 태풍 해일고를 도출하였으며, 최대값의 비교를 통하여 모형의 한계 범위를 제시하였다. 또한, 태풍 매미(0314)에 의한 마산만의 침수를 재현함으로써 SLOSH의 적용 및 활용을 통한 연안 침수 예측 접근 방법의 검증을 수행하였다. 이를 통하여 기후변화로 인한 불확실성을 통계적인 방법으로 해석할 수 있는 발판을 마련한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 태풍 해일, 폭풍 해일, 연안 침수, 한반도 통합 격자망, SLOSH

Abstract : This research mainly focuses on examining the applicability of the deterministic model SLOSH (Sea, Lake and Overland Surges from Hurricanes) on Seas covering South Korea. Also, a simple bathtub approach which estimates coastal inundation area is validated as a first step of estimating effects of sea-level rise on the coastal cities of South Korea according to climate change. Firstly, the typhoon-induced surges are obtained from the model SLOSH by adopting historical typhoons MAEMI (0314) and BOLAVEN (1215). The results are compared to observational, typhoon-induced surge heights at several tidal stations. The coastal inundation area is estimated by comparing the maximum envelop of waves (MEOW) and the elevation of coastal land. It reproduces well the inundation area. It can be seen that this research gained applicability for estimating further potential coastal inundation with climate changes.

Keywords : typhoon-induced surge, storm surge, coastal Inundation, korean basin, SLOSH

1. 서론

태풍 해일고(또는 태풍에 의한 폭풍 해일고)는 태풍에 동반하는 기상조위 중 하나로서 태풍 중심 저기압에 의한 해수면 상승과 태풍 동반 강풍에 의하여 해수가 연안 쪽으로 밀려 올라가는 현상(wind setup)의 중첩으로 발생한다. 이러한 기상조위는 천문조위에 더해져서 연안지역에 막대한 피해를 가져오는 재해요인 중 하나로 분류된다. 우리나라의 경우, 남해와 서해에 접한 연안지역에서는 7월에서 9월 사이에 주로 발생하는 태풍에 의한 영향을 받고 있으며, 만조위 시 태풍이 내습할 경우 연안 범람이나 내수 배제 불량을 발생시키는 원인을 제공하는 등 막대한 피해의 원인이다. 이러한 이유로 2003년 태풍 매미(0314)와 2012년의 태풍 볼라벤(1215)에 의

하여 남해안과 서해안 지역에 태풍 해일에 의한 범람 및 침수피해를 입은 바 있다(Ku et al., 2007; Seo and Kim, 2014; Lee et al., 2014; Lee et al., 2017).

최근에는 지구 온난화로 인한 해수 온도의 상승으로 인하여 북태평양 서부 해양에서 열대 저기압 발생 및 태풍으로의 발달에 충분한 에너지의 공급이 증가함에 따라 강도 높은 태풍의 발생과 내습의 빈도가 증가하고 있다(Seo and Kim, 2014; Lee et al., 2014). 태풍의 강도 증가는 중심기압 저하와 태풍 동반 강풍의 세기 증가로 이어지며, 연안지역에서 높은 해일고의 발생으로 이어진다. 이로 인하여 연안 지역에서 잠재적 재해 위험이 높아지는 바, 기후변화를 고려하여 태풍 해일을 추정할 필요가 있다. 또한, 태풍의 발생, 이동 및 강도 변화에 있어서의 불확실성에 대비하기 위하여 수많은 가

*한국환경정책·평가연구원 환경평가본부 공공인프라평가실(Corresponding author: Jun Ho Maeng, Div. for Public Infrastructure Assessment, Environment Assessment Group, Korea Environment Institute, Bldg B, 370 Sicheong-daero, Sejong-si 30147, Korea. Tel: +82-44-415-7469, Fax: +82-044-415-7799, jhmaeng@kei.re.kr)

**한국환경정책·평가연구원 물국토연구본부 통합물관리연구실(Div. for Integrated Water Management, Water and Land Research Group, Korea Environment Institute)

상태풍에 대하여 태풍 해일고 및 그에 따른 연안 침수 범위 등을 통계적으로 분석함으로써 기후변화로 인한 해수면 상승 영향에 대비하여야 한다.

본 연구는 연안지역에서 기후변화에 의한 해수면 상승 영향을 예측하기 위한 첫 단계로써, 태풍 해일고 예측 수치모델의 검증에 바탕으로 적용 범위를 제시하고 연안 침수 모형 적용을 검증하기 위하여 수행되었다. 미국에서 개발된 폭풍 해일(storm surges)을 예측하기 위한 해양-기상 연계 모형인 SLOSH(Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes)를 우리나라 연안에 적용하기 위하여 한반도 통합 격자망을 소개하고, 태풍 매미(0314)와 볼라벤(1215)을 적용하여 최대 태풍 해일고를 비교함으로써 적용 범위의 한계를 제시하고자 한다. 또한, 태풍 매미(0314)에 의해 SLOSH에서 계산한 태풍 해일고의 최대 포락선을 활용하여 침수 모형에 적용하고, 재해 조사 자료 및 선행 연구와 정성적 비교를 수행함으로써 기후변화 영향을 고려하기 위한 발판을 마련하고자 한다.

2. SLOSH 모형

2.1 모형 개요

SLOSH(Sea, Lake and Overland Surges from Hurricanes) 모형은 미국해양대기관리청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 산하 국립기상청(National Weather Service, NWS)의 국립 허리케인 센터(National Hurricane Center, NHC)에서 발생 혹은 가상 태풍에 의해 발생하는 해일고를 산정하기 위한 결정론적 모형(Deterministic Approach)으로서 해일고 예보를 목적으로 개발되었다(Jelesnianski et al., 1992). SLOSH 모형의 결과는 과거 데이터 기반의 통계학적 모형(Probabilistic Approach)과 함께 중합 모형(Composite Approach)에 적용함으로써 연안지역에서 발생 가능한 폭풍 해일고와 이로 인한 재해 위험지역의 범위 설정 등 취약성 평가의 기반이 된다.

결정론적 모형인 SLOSH는 수심 적분된 준 선형 천수방정식에 기초한 2차원 모형으로서 수심과 표고 자료를 기초로 연안, 하구, 강 및 호수 등에서의 바람 응력에 의해 발생하는 파동을 모의한다. SLOSH는 태풍에 의해 변화하는 기상학적 인자인 중심기압, 태풍 최대 풍속 및 최대 풍속 반경에 의한 해일고를 연안 지역과 해양에서의 격자 해상도를 다르게 하여 계산의 효율성을 높일 수 있는 극좌표 기준의 곡선좌표계(Curvilinear coordinate system on the polar frame of reference)를 차용함으로써 해일고의 실시간 예보에서의 활용도가 높은 장점이 있다. 그러나 SLOSH 결과를 과거 데이터와 비교할 때 최대 해일고와 비교하면 $\pm 20\%$ 의 오차 범위가 발생하며(Jelesnianski et al., 1984; Shaffer et al., 1989), 기상 인자에 의존도가 높기 때문에 통계학적 모형, 중합 모형과 함께 해일 재해 예측 및 국가 방재의 기초 자료로의 활용이 요구된다.

2.2 지배방정식

SLOSH 모형은 비선형 이류와 수평 확산이 생략된 직교격자계(Cartesian Coordinate System)에 기초한 천수 방정식을 비직교격자계(non-Cartesian Coordinate System)으로 공형변화(Conformal Transformation)를 적용한 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Jelesnianski et al., 1992; Kim et al., 1996).

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -g(D+h)\left(B_r \frac{\partial h}{\partial P} - B_i \frac{\partial h}{\partial Q}\right) + f(A_r V + A_i U) + \left[Re\left(\frac{dz}{d\zeta}\right)^*\right]T_x - \left[Im\left(\frac{dz}{d\zeta}\right)^*\right]T_y, \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -g(D+h)\left(B_r \frac{\partial h}{\partial P} + B_i \frac{\partial h}{\partial Q}\right) + f(A_r V + A_i U) + \left[Re\left(\frac{dz}{d\zeta}\right)^*\right]T_x + \left[Im\left(\frac{dz}{d\zeta}\right)^*\right]T_y, \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\left|\frac{dz}{d\zeta}\right|^2 \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial P} + \frac{\partial V}{\partial Q}\right). \quad (3)$$

위의 식(1)과 (2)에서 U 와 V 는 (P, Q) 격자에 나타난 속도, h_0 는 정수압에서의 기준 수심, h 는 기준수심 기준의 변화 수심, D 는 기준면에 대한 정온수심(depth of quiescent water), f 코리올리 변수(Coriolis parameter), g 는 중력가속도를 나타내며, (τ_x, τ_y) 는 (x, y) 좌표에서의 표면응력(surface stress)을 의미한다. 극 좌표계로 변환되지 않은 기상 인자인 T_x 와 T_y 는 다음과 같이 정의된다.

$$T_x = g(D+h)\left(B_r \frac{\partial h_0}{\partial x} - B_i \frac{\partial h_0}{\partial y}\right) + C_r \tau_x - C_i \tau_y, \quad (4)$$

$$T_y = g(D+h)\left(B_r \frac{\partial h_0}{\partial y} + B_i \frac{\partial h_0}{\partial x}\right) + C_r \tau_y + C_i \tau_x. \quad (5)$$

저면응력(bottom stress) 계수인 A, B 와 C 는 수심에 의존하며, 첨자 r 과 i 는 각각 복소수의 실수와 허수를 나타낸다. 위의 식(1)-(5)로 기록된 지배방정식은 Arakawa B-scheme를 기반으로 이산화 되었으며, 3-스텐실 양해유한차분법(3-stencils explicit finite difference scheme)을 활용하여 수치계산이 진행된다.

SLOSH 모형 내에서 채택된 곡선좌표계로의 변환 과정에서 발생하는 자코비안(Jacobian) 항($|dz/d\zeta|^2$, 식(3) 참고)과 변화 수심(h , 수식(1)-(3) 참고)에 의한 비선형성으로 인하여 Fourier 기법을 차용하여 안정 해석(stability analysis)을 수행하는 데 한계점을 갖는다. Jelesnianski et al. (1992)는 해일고를 가정하여 비선형성을 제거하고 이동하는 태풍 중심으로부터의 거리를 고정하여 국부적 안정 기준을 경험적인 방법을 통하여 제시하였다. 이에 따라서 주어진 격자 크기에 적절한 시간 간격(Δt)를 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$\Delta t < \frac{r\Delta\theta}{2\sqrt{gH}} \quad (6)$$

여기에서, $r\Delta\theta$ 는 곡선 좌표계에서의 격자 크기를 의미하며, (\bullet) 는 평균을 의미한다. 본 연구에서는 격자 크기는 최소 격자크기를 사용하였으며, 전체 수심은 SLOSH 모형 내에서 다루는 가장 깊은 수심을 기준으로 시간 간격을 계산하였다.

2.3 바람장 모형

SLOSH 모형 내에서 바람장을 결정하는 것은 외력을 생성하는 가장 중요한 단계이다. 본 모형에서 활용된 바람장 모형은 SLOSH 모형의 전신인 SPLASH(Special Program to List the Amplitude of Surges from Hurricanes)에서 활용되었던 것으로써 정지되어 있는 상태에서 원형 대칭으로 가정된 폭풍(stationary, circularly-symmetric storm)에 대한 기압과 풍향을 다음과 같이 결정한다(Jelesnianski et al., 1992).

$$\frac{1}{\rho_a} \frac{dp}{dr} = \frac{k_s V^2}{\sin\phi} - V \frac{dV}{dr}, \quad (7)$$

$$\frac{1}{\rho_a} \frac{dp}{dr} \cos\phi = fV + \frac{V^2}{r} \cos\phi - V^2 \frac{d\phi}{dr} \sin\phi + k_n V^2. \quad (8)$$

위의 식(7)과 (8)에서 r 은 태풍 중심으로부터의 거리, $p(r)$ 은 태풍 중심으로부터 거리에 따른 기압, $\phi(r)$ 은 풍향, $V(r)$ 은 풍속을 의미한다. k_s 와 k_n 은 경험에 의해 결정되는 조도계수를 나타낸다. 식(7)과 (8)은 풍속 V 가 주어졌을 때 p 와 ϕ 를 풀어낼 수 있으며, 최대 풍속 반경 $r=R$ 에서 최대 풍속이 나타나는 풍속장은 다음과 같다.

$$V(r) = V_R \frac{2Rr}{R^2 + r^2}. \quad (9)$$

본 연구에서는 지역특화기상센터(Regional Specialized Meteorological Center, RSMC)에서 제공하는 best track을

활용하였기에 제공되는 최대 풍속 반경을 기반으로 풍속장이 재현되며, 태풍 해일고를 발생시키는 외력으로 작용하게 된다.

3. 한반도 통합 격자망 검증

3.1 한반도 통합 격자망

본 연구는 위도 28°부터 44°N까지, 경도 117°E부터 139°E까지 한반도를 포함하는 한반도 통합 격자망을 구축하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 동해, 황해 및 남해 모두를 포함하고 있으며, 이는 한반도의 남해안과 서해안으로 상륙하여 통과하는 남해안형 및 서해안형 태풍과 대한해협으로 통과하는 남동해안형 태풍을 모두 고려할 수 있다(Seo et al., 2018).

본 한반도 통합 격자망은 극좌표 기반의 곡선좌표계에서 P와 Q 방향으로 각각 1,545개 및 540개의 유한요소로 구성된다(Fig. 1(a) 참조). 연안지역에서의 해일고를 예측하고자 하므로 관심 지역인 한반도 연안 주위에서 약 500 m의 고해상도의 격자로 구성하였으며, 먼 해상으로 갈수록 약 4.5 km까지 해상도가 낮아진다. 한반도 통합 격자망을 구성하는 연안 수심 및 해안선 자료는 KHOA(2009)에서 제시한 바와 같이 국립해양조사원의 수치해도를 기본으로 연안 수심 및 해안선 자료를 구축하였다. 외해역의 수심 정보는 Choi et al.(2002)과 Seo(2008)의 자료를 바탕으로 구축하였다.

3.2 태풍 및 검증 대상 지역

본 연구에서는 한반도 통합 격자망의 검증을 위하여 과거 한반도에 영향을 미쳤던 영향 태풍의 경로, 크기, 영향 범위 등을 고려하여 남해안형 태풍 매미(0314)과 서해안형 태풍 볼라벤(1215)를 대상으로 수치모의 검증 및 한계 범위 체시를 진행하였다. 이를 위한 지점은 태풍의 이동 경로 주변의 조위관측소를 선정하여 대상 지역으로 제한하였다.

지역특화기상센터(RSMC)에 따르면 태풍 매미(0314)는

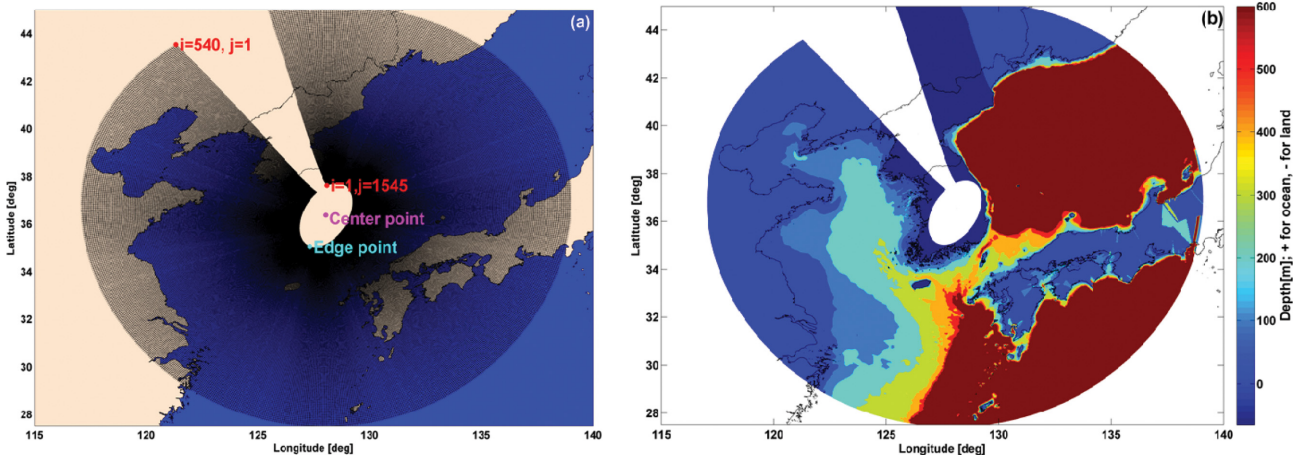


Fig. 1. Korean input basin for SLOSH; (a) a curvilinear, polar grid stretching outward with the hyperbolic factor, and (b) bathymetry (+ for ocean and - for land).

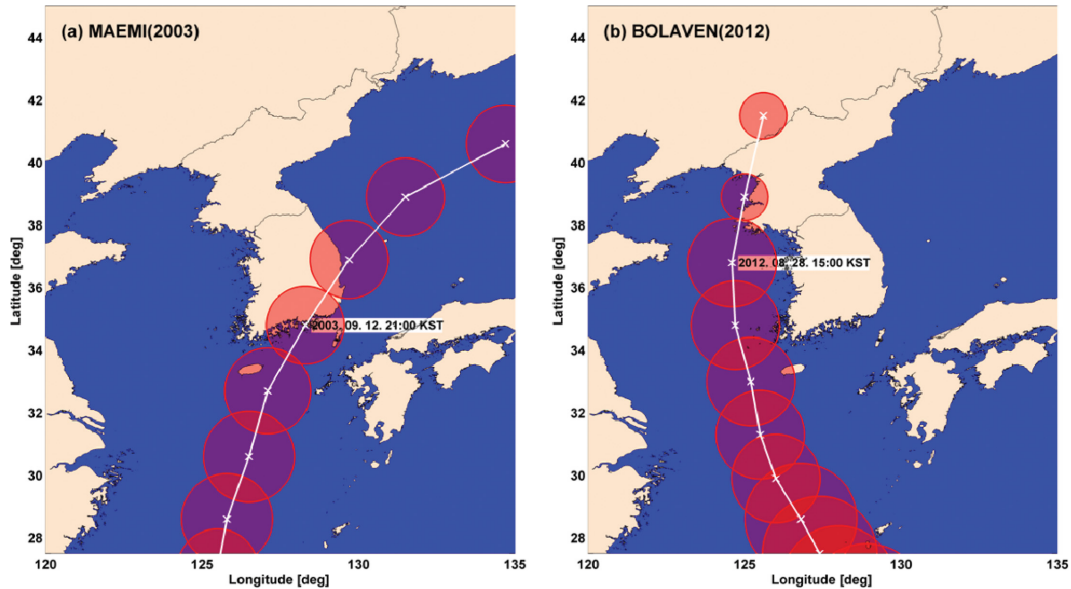


Fig. 2. Track of typhoon (a) MAEMI (2003) and (b) BOLAVEN (2003). Note that the above tracks have reconstituted by adopting the best track data of RSMC (Regional Specialized Meteorological Center).

Table 1. List of tidal station for the SLOSH validation

Tidal station	Latitude [deg]	Longitude [deg]	Tidal station	Latitude [deg]	Longitude [deg]
Masan	35.21	128.59	Incheon	37.45	126.59
Tongyeong	34.83	128.43	Mokpo	34.78	126.37
Busan	35.10	129.04			
Yeosu	34.78	127.77			

2003년 9월 4일 15시(KST)경 열대저기압(Tropical Depression)으로 발생하여 8일 03시경 태풍으로 발달한 후 일본 오키나와 해상을 지나는 동안에 슈퍼태풍으로 발달하였다가 12일 18시경 제주도 성산포 동쪽 부근 해상을 거쳐 12일 20시경에 경상남도 창원시 부근 해안에 상륙하였다. 이 후 세력이 감소하면서 함안군과 대구 동쪽을 거쳐 13일 02시 30분경에 울진 부근 해안을 통해 동해상으로 진출하였다(Fig. 2(left) 참고). 태풍 매미 내습 시 한반도 북쪽에 대륙성 고기압과 동쪽에 위치한 북태평양 고기압으로 인하여 상대적으로 느린 속도로 이동하였고, 약 28°C의 높은 해수면 온도로 인하여 940~950 hPa의 중심기압이 관측되었다. 또한 태풍 중심 부근 최대풍속은 40 m/s가 관측되었으며, 풍속 15 m/s 이상의 태풍 중심반경은 약 330 km에 걸쳐서 관측되었다.

2012년 8월 20일 오후 3시경에 발생한 태풍 볼라벤(1215)은 소형의 열대폭풍(Tropical Storm)으로 발생하였으며, 26일 오전 9시경 일본 오키나와 동남쪽 약 210 km 부근 해상을 중심기압 920 hPa, 최대 풍속 53 m/s, 강풍 반경 550 km의 세력 ‘매우 강’, 크기 ‘대형’의 태풍으로 통과하였다(Fig. 2(right) 참조). 이후 28일 오전 제주도 서해상을 중형 태풍의 크기로 통과하였고, 오후 4시경에 북한 황해도 강령군 부근의 육상으로 상륙하였다. 이때의 중심기압, 최대풍속, 강풍 반경은 각각 960 hPa, 965 hPa, 40 m/s, 38 m/s, 450 km와 400 km였으며, 이 후 온대저기압으로 소멸하였다.

태풍 매미(0314)와 볼라벤(1215)의 이동 경로 및 강풍 반경 내에 위치하는 조위관측소를 중심으로 검증 대상 지역을 선정하였다. 남동해안형 태풍인 매미는 마산, 통영, 부산 및 여수를 검증 지역으로 선정하였으며, 서해안형 태풍인 볼라벤은 인천과 목포 조위관측소를 선정하였다. 각 조위관측소의 위·경도 정보는 Table 1과 같다.

3.3 태풍 해일고 계산 및 모형 검증

결정론적 모형 SLOSH는 태풍의 육상 상륙 48시간 이전부터 내습 이후 12시간 동안 수치모의가 이루어져야 함에 따라 본 연구에서는 최소 60시간 이상 100시간 이하의 수치모의가 진행되었다. Fig. 3은 태풍 매미(0314)와 볼라벤(1215)에 의한 해일 최대 포락선(Maximum Envelopes of Water, MEOW)으로써 태풍의 이동 과정에서 발생시키는 태풍 해일고 중에서 최대값을 추출한 것이다. 우리나라의 남동 해안을 통과한 매미의 경우에는 창원 및 통영 등지에서 최대 해일 포락선이 나타나며, 서해안을 통과한 볼라벤은 강화, 인천 등의 서해안에서 최대 해일 포락선이 계산되었다. 태풍 해일은 바람이 연안 쪽으로 해수면을 밀어 올리거나, 태풍 중심의 저기압 부분에서 해수면의 상승으로 인해서 발생하게 된다. 남해와 서해의 연안에서 최대 해일 포락선이 나타나는 이유는 연안의 완만한 경사면을 따라서 파의 중첩이 일어나기 때문으로 해석된다. 또한, 태풍 매미의 최대 해일 포락선에서는 태

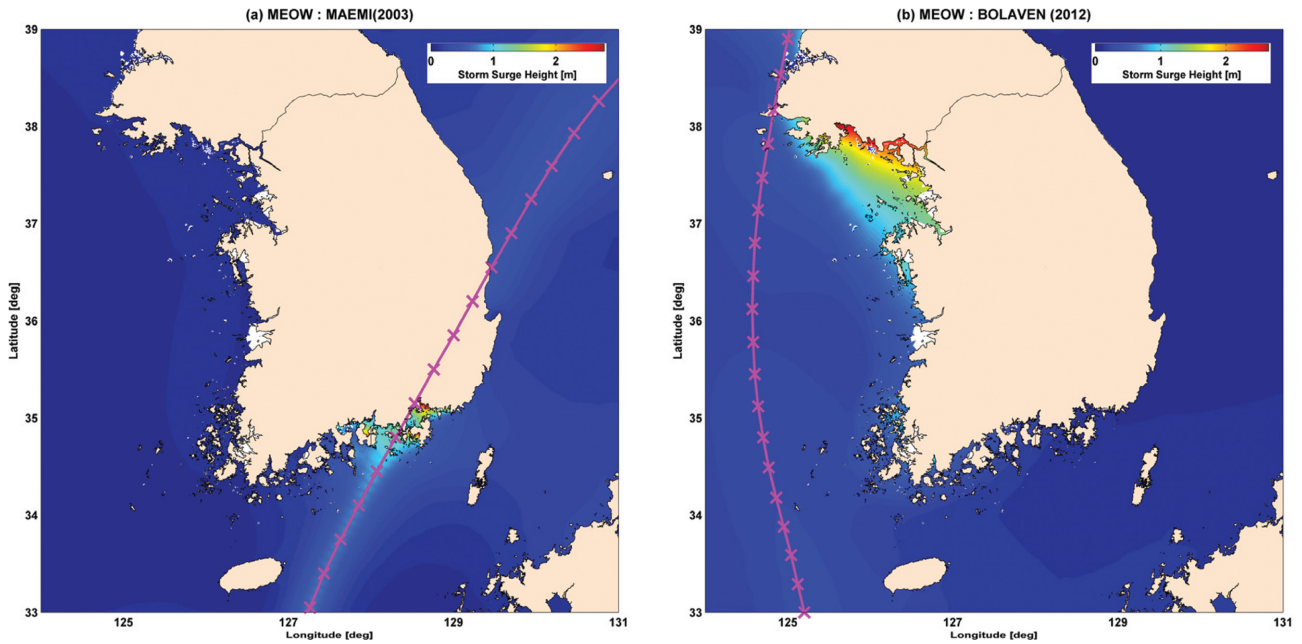


Fig. 3. Maximum Envelopes of Water obtained from SLOSH (Sea, Lake and Overland Surges from Hurricane) by typhoons passed through Seas of Korea peninsula, (a) MAEMI (2003), and (b) BOLAVEN(2012).

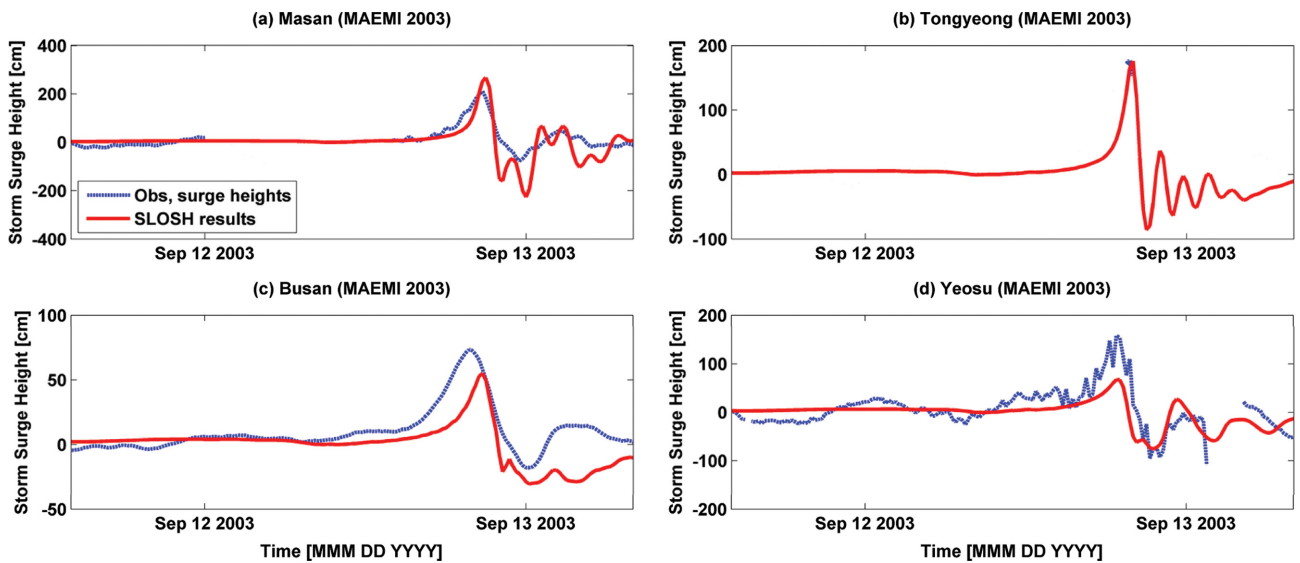


Fig. 4. Time-varying typhoon-induced surge heights obtained by typhoon MAEMI (2003) from SLOSH (red straight line) and tidal stations (blue dotted line) at (a) Masan, (b) Tongyeong, (c) Busan, and (d) Yeosu.

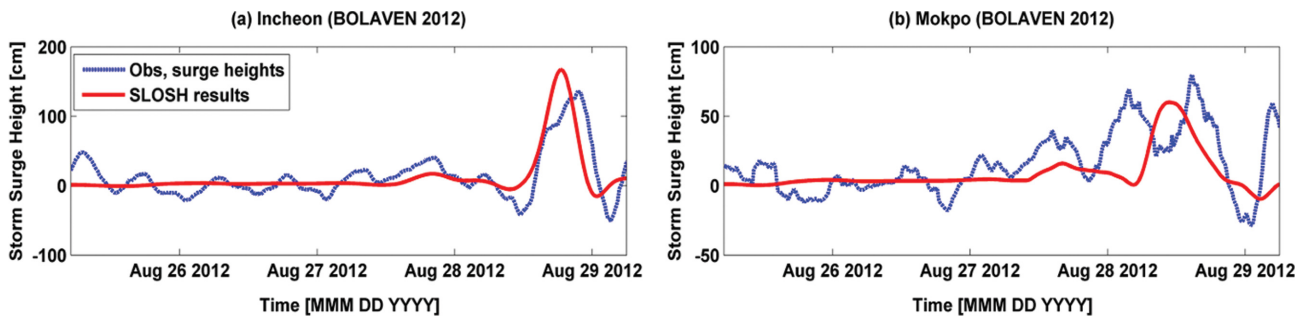


Fig. 5. Time-varying typhoon-induced surge heights obtained by typhoon BOLAVEN (2012) from SLOSH (red straight line) and tidal stations (blue dotted line) at (a) Incheon and (b) Mokpo.

풍의 내습 이전의 경로를 따라서 태풍 중심 근처의 해수면이 상승한 흔적을 살펴볼 수 있으며, 태풍 매미에서 관측된 낮은 중심기압으로 인한 해수면 상승임을 확인할 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 태풍 매미(2003)와 볼라벤(2012)의 영향으로 인해 발생한 태풍 해일고의 관측값(파란색 점선)과 SLOSH 추정값(붉은색 실선)을 나타낸다. 남동해안형 태풍인 매미의 경우에는 마산, 통영, 부산 및 여수 조위관측소에서 SLOSH 계산 결과를 관측값을 비교하였으며, 서해안형 태풍인 볼라벤의 경우에는 인천과 목포 조위관측소에서 비교하였다. 태풍 해일고 비교에 사용된 조위 관측값은 국립해양조사원에서 제공하는 조위를 조화분석을 통하여 천문조의 영향을 제외한 값을 기상에 의한 해면의 변동으로 구분하여 사용하였다.

태풍 해일의 변화 패턴을 살펴보면, 태풍이 우리나라에 접근함에 따라 급격한 해수면의 상승이 발생하며, 이후에 급격한 해수면의 하강이 관측되고 수치모의 되는 것을 Fig. 4와 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 최대 해일고의 출현 시점이 최소 15분(태풍 매미, 마산과 통영 조위관측소)에서 최대 4시간(태풍 볼라벤, 목포 조위관측소)의 시간 상의 차이가 발생한다. 최대 태풍 해일고에 있어서 마산, 통영 및 인천의 조위관측소에서는 비슷하거나 과대평가되어 예측되었으나, 부산, 여수 및 목포 조위관측소에서는 과소평가된 값이 도출되었다. 태풍 해일고는 수심이 낮고 경사가 완만한 곳에서 높게 발달되는 특성이 반영되어 마산, 통영 및 인천 조위관측소에서 높은 해일이 잘 모의되었다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 보여준 값 중에서 관측치와 SLOSH 결과의 최대 태풍 해일고의 일대일 비교를 보여 주고 있으

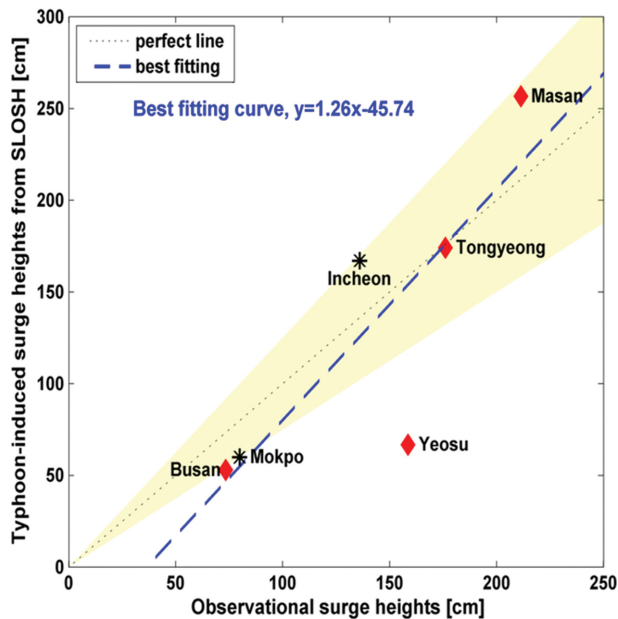


Fig. 6. Comparison of maximum typhoon-induced surge heights by typhoon MAMEI (red diamond) at Masan, Tongyeong, Busan and Yeosu tidal stations and typhoon BOLAVEN (2012) at Incheon and Mokpo tidal stations.

며, Fig. 6을 관통하는 일대일 대응 선(perfect line)에서 가까울수록 최대값 사이의 절대 오차가 작은 것을 의미한다. 여수 조위관측소에서는 약 -60% 이내의 값으로 작게 계산되는 것을 제외한다면, 관측치 기준에 대한 상대 오차의 백분위 범위가 약 $\pm 25\%$ 에 근접하는 값으로 추정되었다. 상대 오차의 정의는 다음의 식(10)과 같으며, Hb_{SLOSH} 와 Hb_{Obs} 는 각각 SLOSH와 조위관측소에서 얻어진 태풍 해일고 값을 의미한다.

$$\text{Relative Error [\%]} = \frac{Hb_{SLOSH} - Hb_{Obs}}{Hb_{Obs}} \times 100 \quad (10)$$

Glahn et al.(2009)와 Jelesnianski et al.(1984)에 따르면 미국 연안에서 추정된 해일고에 대한 SLOSH의 오차범위는 $\pm 20\%$ 로 나타났으나, 약 3 m(10 ft) 이상의 해일고에만 해당되는 오차범위로 제시하였다. 또한, SLOSH가 조석과 파랑으로 인한 해수면 상승을 포함하지 않기 때문에 더 많은 실제 발생 태풍에 대한 비교를 통하여 신뢰 구간을 설정함으로써 불확실성을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

4. 연안 침수 적용 및 비교

4.1 Simple Bathtub Approach

본 연구에서 연안 침수 계산에 적용한 방안은 Simple Bathtub Approach로써 연안에 근접한 격자에서의 해수면 상승량이 연안까지 전파된다는 것으로 가정한 후, 침수범위 및 침수심을 계산하는 것이다. Fig. 1(a)의 격자에서 i 방향으로 연안에서 육지로 물이 이동한다는 가정 하에, 다음의 zero-side rule을 적용하여 침수영역을 산출하였다.

$$F_{i,j} = \begin{cases} E_{i,j} \leq S, & 1 \\ E_{i,j} > S, & 0 \end{cases} \cdot (S - E_{i,j}) \quad (11)$$

$E_{i,j}$ 는 표고, S 는 해수면 높이를 의미한다. 본 연구에서 활용한 육상 지형자료는 국토지리정보원에서 제공하는 5 m 해상도의 정밀 수치표고모형(이하 'DEM') 자료를 활용하였다. 또한, 국립해양조사원에서 제공하는 수직기준 변환 서비스를 활용하여 해수면의 높이를 DEM 기준으로 변환하여 침수 모형을 적용하였다.

4.2 마산만의 침수 영역 비교

2003년 한반도를 내습한 태풍 매미(0314)를 대상으로 결정론적 모형 SLOSH를 이용하여 해일고를 산출한 후, 식(11)을 사용하여 침수영역을 계산하였다. 약최고고조위(Approx. H.H.W.)의 천문조인 경우에 발생하는 태풍 해일고에 의한 침수를 계산하였으므로 침수 영역 조사 자료 및 선행 연구와 차이가 발생할 수 있음을 밝혀둔다. 또한, 태풍 매미의 경로, 중심기압 깊이, 최대 풍속 반경 등의 필요 정보는 지역특화기상센터(RSMC)에서 제공하는 태풍 최상이동경로(Best Track)

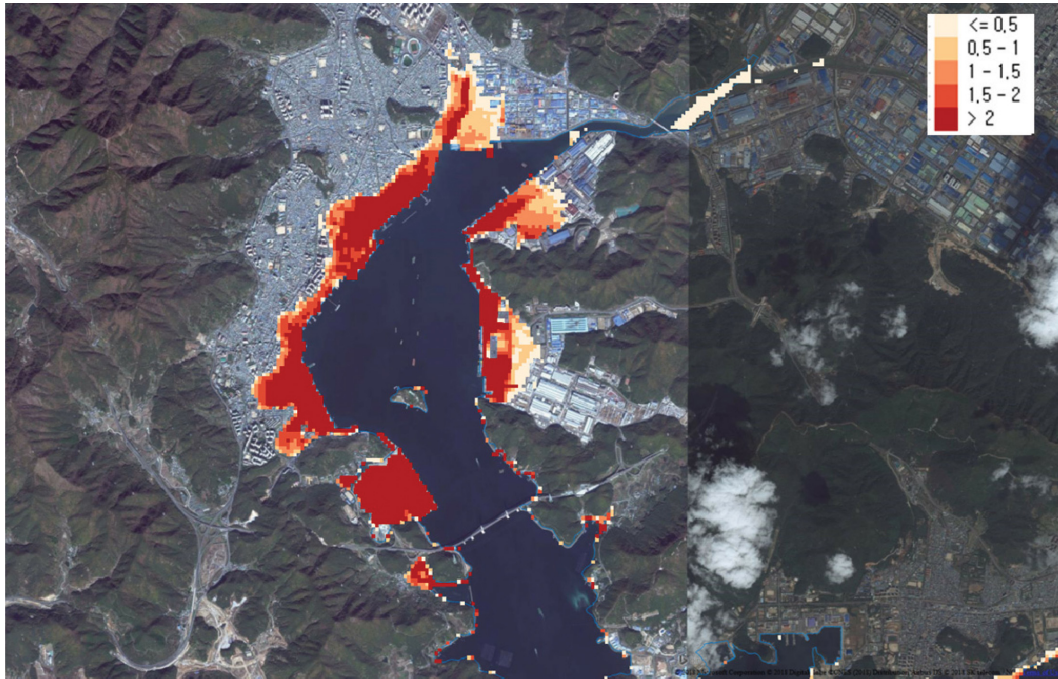


Fig. 7. Coastal Inundation area in Masan bay of South Korea (Satellite image source provided by Bing via qgis).

을 참고하여 SLOSH 입력자료를 생성하였다.

마산만은 남해와 연결되어 길고 좁게 발달되어 있어서 태풍 강풍에 의한 해수면의 상승이 마산만의 안쪽으로 전달되면서 진폭이 발달하는 경향을 갖는다. 마산만의 북부지역은 이러한 고파랑에 의한 범람에 노출되어 있으며, 2003년 내습한 태풍 매미에 의하여 범람 및 침수피해를 겪은 바 있다. Fig. 7은 SLOSH에서 생성된 태풍 최대 해일 포락선에 의한 마산만의 침수범위 및 침수심을 나타낸다. 선행연구(Chun et al., 2008; Lee et al., 2013)에서 제시한 태풍 매미에 의한 해일 피해 재해조사 자료 및 예측 자료와 비교할 때, 본 연구결과에서도 마산만의 북측과 서측에 침수피해가 발생한 것과 최대 침수심이 약 2.2 m로 계산된 부분에서 본 연구에서 제시한 태풍 해일에 의한 침수 영향 예측이 잘 수행되었다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 해수면 상승 영향 예측을 목적으로 결정론적 모형인 SLOSH의 국내 연안의 적용성 검증을 수행하였다. SLOSH(Sea, Lake and Overland Surges from Hurricanes)는 미국 국립허리케인센터(National Hurricane Center, NOAA)에서 태풍의 이동 경로 및 강도 등의 태풍 인자 변화로 인하여 발생 가능한 태풍 해일고를 산정하기 위하여 개발된 모형으로써 국내의 수치해도, 해안선 자료 및 수치표고모형(DEM)을 활용하여 한반도 통합 격자망을 작성하였다. Seo et al.(2018)에서 해일고 높이가 약 3 m 이상인 해일고에서의 오차범위가 $\pm 20\%$ 임을 보였으며, 본 연구에서는 0.5 m 이상의

해일에서 $\pm 25\%$ 의 오차범위를 제시함으로써 국내 연안에서의 적용 한계 범위를 제시하였다. 결정론적 모형 SLOSH는 높은 해일에 대비하기 위한 목적으로 개발되어 상대적으로 낮은 태풍 해일고 발생에 있어서 오차범위가 확대되는 한계가 있으나, 오차범위를 제시함으로써 수치모형의 합리적인 적용 범위를 제시하였다. 또한, 최대 해일 포락선을 활용하여 연안 침수 범위 및 침수심을 연안 침수 모형(즉, Simple Bathtub Approach)을 적용하여 재현하였고, 해일 피해 조사 자료 및 선행 연구와의 비교를 통하여 연안 침수 모형 적용의 타당성을 확보하였다.

SLOSH는 태풍 해일고의 예측에 있어서 상대적으로 높은 해일에서 오차 범위가 작고 계산 비용이 타 수치모형에 의하여 적은 이점을 가진다. 기후변화의 영향은 전지구적 해수면 상승뿐만 아니라 태풍의 강도 증가에도 영향을 미치며 이는 태풍 해일고 상승으로 이어진다. 기후변화에 의한 태풍 인자의 변화에는 불확실성이 존재하기 때문에 이를 제어하기 위하여 다양한 가상 태풍에 대해서 태풍 해일고를 예측하고 이를 통계적으로 분석하여 연안재해의 범위를 예측하고 있다. 본 연구는 통계분석에 필요한 자료 생성 및 신뢰도의 범위를 제공할 수 있는 기반을 마련하였다고 판단된다. 추후의 연구를 통하여 본 연구를 바탕으로 기후변화와 해수면 상승으로 인한 영향 평가를 진행하고자 하는 바이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “기후변화대응 환경기술개발사업(2014001310006)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- KHOA (2009). Master Plan & Feasibility Study for Coastal Vulnerability Map, Korea Hydrographic and Oceanographic Agency.
- Choi, B.H., Kim, K.O. and Eum, H.M. (2002). Digital Bathymetric and Topographic Data for Neighboring Seas of Korea. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 14(1), 41-50.
- Chun, J.-Y., Lee, K.-H., Kim, J.-M. and Kim, D.-S. (2008). Inundation Analysis on Coastal Zone around Masan Bay by Typhoon Maemi (No. 0314). *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 22(3), 8-17.
- Glahn, B., Taylo, A., Kurkowski, N. and Shaffer, W.A. (2009). The Role of the SLOSH Model in National Weather Service Storm Surge Forecasting. *National Weather Digest*, 33(1), 3-14.
- Jelesnianski, C.P., Chen, J. and Shaffer, W.A. (1992). SLOSH: Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes. NOAA Technical Report NWS 48. National Weather Service, Silver Spring, MD, USA.
- Jelesnianski, C.P., Chen, J., Shaffer, W.A. and Gilad, A.J. (1984). SLOSH - A Hurricane Storm Surge forecast Model. *Oceans 1984*, Washington, DC, USA, 314-317.
- Kim, S.-C., Chen, J. and Shaffer, W.A. (1996). An Operational forecast Model for Extratropical Storm Surges along the U.S. East Coast. *Conference on Oceanic and Atmospheric Prediction*. Atlanta. Amer. Meteor. Soc., 281-286.
- Ku, H., Lee, S., Lee, Y.-K. and Kim, H.-S. (2007). Statistical Model and Characteristics of Typhoon-Induced Rainfall around Korean peninsula. *J. of Industrial Science Technology and Institute*, 21(2), 85-95.
- Lee, H.Y., Kim, D.S., Park, J.R. and Hong, S.J. (2017). Operation of Real-time Storm Surge Response System for Decision-making Support. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 17(3), 367-380.
- Lee, S., Won, C.-H. and Kim, Y.-M. (2014). Numerical Prediction of Typhoon Storm Surge using Ocean-Meteorology Coupled Model. *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, 18(4), 207-214.
- Lee, Y., Lee, C. and Ahn, S. (2013). Development of the Risk Index to Inspect the Specific Buildings against Flood. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 13(6), 29-37.
- Seo, J., Ku, H., Cho, K., Maeng, J.H. and Lee, H. (2018). Application of SLOSH in estimation of Typhoon-induced Storm Surges in the Coastal Region of South Korea. *J. of Coastal. Res.*, SI85, 21-25.
- Seo, S.-N. (2008). Digital 30 sec Gridded Bathymetric Data of Korea Marginal Seas - KorBathy30s. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 20(1), 110-120.
- Seo, S.-N. and Kim, S.-I. (2014). Storm Surges in West Coast of Korea by Typhoon Bolaven (1215). *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 26(1), 41-48.
- Shaffer, W.A., Jelesnianski, C.P. and Chen, J. (1989). Hurricane Storm Surge Forecasting. *Oceans '86*, Washington, DC, USA, 1379-1385.

Received 7 December, 2018

1st Revised 8 January, 2019

2nd Revised 10 January, 2019

Accepted 10 January, 2019