

## 부산 연안에서 태풍에 의한 폭풍해일의 수치모델링

김차겸\* · 강태순\*\*†

\* 경남도립남해대학교 산업안전관리과 교수, \*\* ㈜지오시스템리서치 제1본부 본부장

## Numerical Modelling of Typhoon-Induced Storm Surge on the Coast of Busan

Cha-Kyum Kim\* · Tae-Soon Kang\*\*†

\* Professor, Department of Industrial Safety Engineering, University of Gyeongnam Namhae, Namhae, Gyeongnam, Korea

\*\* Executive Director, GeoSystem Research Corporation, Gunpo, Gyeonggi-do, Korea

**요 약** : 태풍 매미 통과 시에 부산연안에서 폭풍해일고를 해석하기 위한 수치실험을 수행하였다. 태풍 매미는 2003년 9월 12일 21:00에 중심기압 950hPa로 우리나라 남해안에 상륙하였으며, 지난 수십년 간에 걸쳐 최악의 해안재해로 기록되었다. 태풍 매미 통과시 부산항, 여수항, 통영항, 마산항, 제주항 및 서귀포항에서 관측된 폭풍해일고와 계산된 해일고의 시계열을 비교하였으며, 계산결과와 관측결과는 잘 일치하였다. 태풍해일고는 마산항에서 약 230 cm로 가장 크게 나타났으며, 여수항과 통영항에서는 약 200 cm, 부산항에서는 약 75 cm로 나타났다. 폭풍해일 수치실험결과, 부산 동부 연안에서 해일고는 52~55 cm 범위이고, 외해로 갈수록 해일고는 감소하였다. 따라서 반폐쇄된 만에서는 해일고의 상승으로 인한 연안 침수범람 피해가 크게 발생할 것으로 사료되며, 본 수치실험결과는 태풍으로 인한 연안재해 저감을 위한 중요한 자료로 사용될 수 있다.

**핵심용어** : 폭풍해일, 수치모델, 태풍 매미, 부산 연안, 해일고

**Abstract** : A numerical simulations were performed to investigate the storm surge during the passage of Typhoon Maemi on the coast of Busan. The typhoon landed on the southern coasts of Korean Peninsula at 21:00, September 12, 2003 with a central pressure of 950 hPa, and the typhoon resulted on the worst coastal disaster on the coast of Busan in the last decades. Observed storm surges at Busan, Yeosu, Tongyoung, Masan, Jeju and Seogwipo harbors during the passage of the typhoon were compared with the computed data. The simulated storm surge time series were in good agreement with the observations. The simulated peak storm surges were estimated to be 230 cm at Masan harbor, 200 cm at Yeosu harbor and Tongyoung harbor, and 75 cm at Busan harbor. The computed storm surges along the east coast of Busan measure 52 to 55 cm, exhibiting a gradual reduction in surge height as one moves further from the coast of Busan. Therefore, coastal inundation due to the storm surge in the semi-enclosed bay can induce great disasters, and the simulated results can be used as the important data to reduce the impact of a typhoon-induced coastal disaster in the future.

**Key Words** : Storm surge, Numerical model, Typhoon Maemi, Coast of Busan, Surge height

## 1. 서론

통상적으로 발생하는 해수면승강은 천문조와 기상조가 중첩되어 일어나는 현상으로 기상조는 상대적으로 작고, 천문조가 우세하게 나타난다. 천문조에 의한 해수면승강은 천체운동과 같이 규칙적으로 반복되기 때문에 장기간의 조위예보가 가능하다. 그러나 태풍이나 강한 저기압의 영향을 받을 경우 바람이나 현저한 기압저하로 인해 예보조위와 일치하지 않는 해수면상승 현상이 일어나는데 이것을 폭풍해일(storm surge)이라 한다. 고조 시에 폭풍해일이 발생하면 해수면의 수위가 중첩되어 수위는 더욱 높아지게 된다. 이와 같은 현상이 해안도로나 방파제와 같은 연안시설물 또는 주거시설과 인명 등에 큰 피해를 미치기 때문에 폭풍해일을 예측하는 것이 연안 방재 차원에서 대단히 중요하다. 연안에서 태풍 통과 시에 발생하는 해수면의 상승은 주로 강한 바람에 의한 외해수의 유입과 저기압을 동반한 기압강하에 의해 발생한다. 표준대기압은 1,013 hPa이며, 이것을 기준으로 기압이 1 hPa 낮아짐에 따라 해수면은 약 1 cm 정도 상승하게 된다. 태풍의 이동경로에 따라 해수면 상승도 이동하게 되며, 태풍이 연안으로 접근하게 되면 천수효과 및 천퇴

\* First Author : kick@namhae.ac.kr, 055-254-2532

† Corresponding Author : kangts@geosr.com, 031-5180-5703

나 육지 등 장애물의 영향으로 해수면 상승고는 변하게 된다. 바람이 바다에서 육지로 향하여 불면 해수면에 작용하는 바람의 마찰력에 의해 해수는 외해에서 육지 쪽으로 운반되고, 이것이 축적되어 해수면이 상승하게 된다. 이와 같은 효과를 바람에 의한 해수면상승(wind setup)이라고 한다. 폭풍에 의한 해일은 천해역으로 진행하게 되며, 특히 만내로 진입하게 되면 만내에서 반사가 일어나게 되고 그 에너지의 대부분은 장시간에 걸쳐 만내에 정체하면서 고유의 해수면 진동을 유발하게 된다. 이를 만내 부진동(seiche)이라 하며, 이러한 만내 부진동은 상당히 장시간 지속된다. 일반적으로 만내의 경우 태풍의 중심이 만으로부터 약 200~400 km 떨어져 태풍의 직접적인 영향을 받기 이전에 평균해수면의 상승이 시작되며, 태풍권역 내에 들어오면 해수면의 상승은 급격해지고, 또한 연이어 만의 고유진동에 의한 해수면변동이 계속 나타난다. 해저지형과 해안지형의 형상에 의해 폭풍해일이 증폭될 수도 있고 감소될 수도 있다. 특히 만입구가 남측을 향하고 있고 풍향이 남풍계열일 경우, 만의 수심이 비교적 얕다면 큰 폭풍해일이 내습할 가능성이 대단히 높다. 일반적으로 태풍에 의한 풍속과 풍향, 태풍의 이동 속도·경로, 저기압의 구조 외에도 해저마찰 효과, 풍파와 너울의 효과, 기상교란의 이동과 장파 속도와의 공명현상, 지구 자전 효과, 만의 고유진동 등이 폭풍해일 현상에 복잡하게 작용하게 된다.

국내에서 폭풍해일에 대한 2차원 수치모델해석으로는 Choi et al.(2004), Lee et al.(2007), Hur et al.(2008), Kang et al.(2008), Kang et al.(2010)의 연구가 있으며, 3차원 수치모델로는 Kim and Lee(2007; 2011), Kim et al.(2011) 등의 연구가 있다. 국외에서 폭풍해일에 대한 연구로는 Westerink et al.(1992), Watanabe and Shibaki(2002), Kawai et al.(2004; 2005), Wang et al.(2005), Yeh et al.(2005), Fairley et al.(2016) 등의 연구가 있다. Westerink et al.(1992)은 2차원 유한요소모형을 이용하여 1985년 허리케인 Kate 통과시 미시시피만 주변해역의 해수면 변동 및 해수 순환 특성을 해석하였다. Watanabe and Shibaki(2002)은 파랑의 setup과 밀도효과를 고려한 multi-level을 이용하여 태풍해일 해석 모델을 개발하였다. Kawai et al.(2004)은 파랑-태풍해일을 결합한 모델을 개발하였다. Wang et al.(2005)은 황해와 발해 연안에서 수치모델과 극치해석 기법을 이용하여 재현

주기별 storm surge의 최대 상승량을 계산하였다. Yeh et al.(2005)은 Taiwan 해역을 대상으로 파랑-조석-해일을 결합한 모델을 이용하여 연안재해 경고시스템구축에 대한 연구를 하였다. 또한 Kim(2021)은 최대풍속과 지속기간 3시간 강우량을 이용하여 피해규모를 예상할 수 있는 새로운 태풍등급을 제시하였다. 본 연구에서는 연안도시 침수 예경보 시스템 구축 일환으로 2003년 태풍 매미 통과 기간 중에 부산 연안에서 매시간별 폭풍해일 특성을 수치 해석하고자 한다.

## 2. 태풍 특성과 피해사례

### 2.1 우리나라 월별 태풍 특성

태풍은 열대성 저기압의 일종으로 북태평양 서쪽 북위 5°~25°, 동경 120°~160° 해역에서 많이 발생하며, 우리나라에 내습할 때의 태풍은 최성기를 지나 약화기에 접어들 때이다. 태풍은 일반적으로 육상 상륙 전 해상에서 대단히 큰 힘을 가지고 있으나, 상륙 후에는 수증기 흡수량 감소, 마찰 및 지형지물 등에 의해 약화되는 것이 보통이다. 태풍의 이동경로는 발생 후 서서히 서진 또는 북서진하다가 크게 2경로로 대별될 수 있다. 첫번째 경로는 서진하거나 북서진하여 필리핀군도, 중국서해 등으로 진행하는 것이고, 또 하나는 큰 포물선 형태로 방향을 바꿔 중국대륙 동쪽, 한국, 일본 등으로 북동진하는 것이다. 그러나 태풍의 경로는 실제로는 매우 가변적이며, 최근 지구온난화 등 기후변화에 따라 이상 경로를 취하는 경우가 종종 있다. 우리나라는 지리적으로 일본에 비하여 태풍의 영향을 비교적 적게 받는 편이나 북동진하는 태풍의 길목에 위치하여 매년 평균적으로 3~4개 태풍의 영향을 받고 있다(Table 1). 기상청(KMA, 1986) 태풍백서에 의하면 태풍이 적도전선 부근에서 발생하여 점차 북상한 후 우리나라에 영향을 미칠 수 있는 영역, 즉 32°~40°N, 120°~138°E에 도달하였을 때를 한반도에 영향을 끼친 태풍이라고 정의하고 있다. 최근 30년간(1991~2020년) 발생한 태풍은 연평균 25.1개, 우리나라에 영향을 미친 태풍의 수는 연평균 3.4개이다(Table 1). Table 1에서 괄호안의 수는 우리나라에 영향을 미친 태풍의 수이며, 우리나라에 영향을 미치는 태풍은 여름철인 7~9월에 집중적으로 발생하고 있다.

### 2.2 태풍피해 사례

Table 1. Monthly typhoon occurrence data (KMA)

Period	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Mean
1991 ~ 2020 (30-year mean)	0.3	0.3	0.3	0.6	1.0	1.7 (0.3)	3.7 (1.0)	5.6 (1.2)	5.1 (0.8)	3.5 (0.1)	2.1	1.0	25.1 (3.4)
2011 ~ 2020 (10-year mean)	0.6	0.5	0.4	0.4	0.6	2.2 (0.4)	4.1 (1.1)	5.1 (1.3)	5.3 (1.0)	3.7 (0.2)	2.2	1.0	26.1 (4.0)

태풍이 이동할 경우 진행방향 오른쪽의 바람은 강해지고 왼쪽은 약해진다. 2003년 9월 태풍 매미 통과 시 부산과 경남지역은 태풍 매미의 오른쪽에 위치해 있기 때문에 피해가 컸다. 태풍의 오른쪽 반원에서는 태풍의 진행방향과 바람방향의 방향이 서로 비슷해 가중되어 풍속이 커지고, 반면 왼쪽 반원에서는 그 방향이 서로 반대가 돼 상쇄되어 상대적으로 풍속이 약화된다. 태풍 매미 통과 시 부산 연안의 경우 위험반경에 들어간 순간풍속이 초속 약 47m에 달하는 강풍을 기록하였으며, 강풍으로 인한 피해가 컸다. 경남지역은 강풍에 의한 피해와 해일로 인한 침수피해가 컸다. 특히, 마산해안은 폭풍해일고가 약 2.3m 발생하여 마산항 주변의 해안도시가 침수되었다(Kim and Lee, 2011; Kim et al., 2010). 부산과 경남지역의 피해가 컸던 또 하나의 원인은 만조시간대에 태풍이 상륙해 해일 피해까지 겹쳤기 때문이다. 태풍이 상륙했던 9월 12일 오후 8시 경에는 만조시간대로 태풍이 강한 바람과 파도를 연안으로 수송하면서 폭풍해일까지 덮쳤다.

Table 2는 1937~2021년까지 발생한 태풍의 순간최대풍속을 1위~10위로 순위를 정하여 나타낸 것이다. 이 기간 중 순간최대풍속이 가장 컸던 태풍은 태풍 매미로 2003년 9월 12일 제주도 고산에서 60 m/sec를 기록하였다. Table 3은 1904~2021년까지 태풍 통과 시 발생된 최대강수량을 1위~10위로 순위를 정하여 나타낸 것이다. 일 최대강수량은 2002년 8월 31일 태풍 루사 통과 시 강원도 강릉에서 870.5 mm를 기록하였으며, 이 기록은 우리나라 연평균 강수량의 절반 이상을 차지하는 값이다.

### 3. 폭풍해일 수치모형실험

#### 3.1 수치모형의 기본방정식

폭풍해일을 예측하기 위해 광역 모델에서 황해·동중국해 및 동해 전역을 포함하여 수치모형실험을 수행한 후, 연구 대상해역인 협역에서 고해상도의 폭풍해일 실험을 동시에

Table 2. Highest instantaneous wind speed during the passage of a typhoon (1937-2021, KMA)

Ranking	Name	Site	Highest instantaneous wind speed (m/s)	Dates
1st	MAEMI	Jeju-do	60.0	Sep. 12, 2003
2nd	PRAPIROON	Heuksando	58.3	Aug. 21, 2000
3rd	RUSA	Jeju-do	56.7	Aug. 31, 2002
4th	CHABA	Jeju-do	56.5	Oct. 05, 2016
5th	LINGLING	Heuksando	54.4	Sep. 07, 2019
6th	NARI	Ulleung	52.4	Sep. 17, 2007
7th	BOLAVEN	Wando	51.8	Aug. 28, 2012
8th	TED	Ulleung	51.0	Sep. 25, 1992
9th	MAYSAK	Jeju-do	49.2	Sep. 03, 2020
10th	VERA	Uljin	49.0	Aug. 28, 1986

Table 3. Daily maximum rainfall during the passage of a typhoon (1904~2021, KMA)

Ranking	Name	Site	Daily maximum rainfall (mm)	Dates
1st	RUSA	Gangneung	870.5	Aug. 31, 2002
2nd	MITAG	Uljin	556.9	Oct. 03, 2019
3rd	AGNES	Jangheung	547.4	Sep. 02, 1981
4th	YANNI	Pohang	516.4	Sep. 30, 1998
5th	GLADYS	Busan	439.0	Aug. 23, 1991
6th	NARI	Jeju-do	420.0	Sep. 16, 2007
7th	MAEMI	Namhae	410.0	Sep. 12, 2003
8th	BETTY	Haenam	407.5	Aug. 20, 1972
9th	OLIVE	Samcheok	390.8	Aug. 05, 1971
10th	OLGA	Dongducheon	377.5	Aug. 01, 1999

수행하였다. 수치모형의 구성은 조석에 의한 해수면 상승, 폭풍에 의한 해일 및 파랑에 의한 해수면 상승효과까지 동시에 고려할 수 있어야 범람 및 침수의 예측 정확도를 높일 수 있다. 본 수치모형은 광역에서 협역까지 여러 단계의 계산영역 격자를 네스팅 할 수 있기 때문에 효율적으로 계산 시간을 단축할 수 있다. 또한, 협역의 지형특성을 반영할 수 있어 해일고를 보다 정도 높게 예측할 수 있는 장점이 있다. 침수 및 범람에 대한 육지부의 Wet-Dry 기법이 적용되어 합리적이고 정도 높은 해일예측이 가능하다. 해일 및 고조와 같이 장파인 파랑의 운동은 장파의 비선형이론에 의해 해석하고 있다. 천해 장파이론은 상대파고인  $H/L$  ( $H$ 는 파고,  $L$ 은 파장) 및 상대수심인  $h/L$  ( $h$ 는 수심,  $L$ 은 파장)가 모두 작고, 압력은 정수압 분포이고, 수평 유속성분인  $u$ ,  $v$ 는 연직방향으로 일정한 분포로 가정하고 있다. 즉, 해저에서 해수면까지 연직 방향으로 적분한 방정식으로 표현된다. 연속방정식과 Navier-Stokes의 운동방정식을 기본방정식으로 한다.

연속방정식과 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \\ +fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + A_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \\ -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + A_h \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $x, y$ 는 수평 좌표,  $z$ 는 평균해면을 기준으로 연직 하향이고,  $u, v, w$ 는  $x, y, z$  방향의 유속 성분,  $p$ 는 압력,  $f$ 는 코리올리계수 ( $f=2\omega \sin\theta$ ,  $\omega$ 는 지구자전의 각속도,  $\theta$ 는 위도),  $A_h$  및  $A_v$ 는 각각 수평 및 연직방향 와동점성 계수이다. 해면이 평균해면상  $\eta$ 의 높이에 있으며 해수면기압을  $p_0$ 라 하고,  $z$ 방향의 운동방정식을 수심방향으로 적분하면, 압력  $p$ 는 다음과 같다.

$$p = \rho g(\eta - z) + p_0 \quad (4)$$

연속방정식과 운동방정식에서 유속  $u, v$ 를 해저  $z=-h$ 부터  $z=\eta$ 까지 적분하고  $x, y$ 방향의 유량  $M, N$ 을 다음과 같이 정의하여 적용한다.

$$M = \int_{-h}^{\eta} u \, dz = u(h + \eta) = uD,$$

$$N = \int_{-h}^{\eta} v \, dz = v(h + \eta) = vD \quad (5)$$

여기서 전수심  $D=h+\eta$ 이고, 이와 같이 수심 방향으로 적분된 연속방정식 및 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) \\ = +fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) \\ + A_h \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) \\ = -fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sy} - \tau_{by}) \\ + A_h \left( \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

해수면에 작용하는 전단응력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{sx} &= \rho_\alpha C_D W_x \times \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \\ \tau_{sy} &= \rho_\alpha C_D W_y \times \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,  $\rho_\alpha$ 는 공기의 밀도( $1.22 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ),  $C_D$ 는 해면의 저항 계수,  $W_x, W_y$ 는 해상 10m 고도의  $x, y$  방향 풍속이다. 해저면에 작용하는 저면 전단응력은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \tau_{bx} &= \frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}} M_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2} \\ \tau_{by} &= \frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}} N_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서  $\rho_w$ 는 해수의 밀도( $1.03 \text{ g/cm}^3$ ),  $g$ 는 중력가속도,  $n$ 는 Manning의 조도계수( $=0.025$ )이다.

## 3.2 계산 방법 및 조건

### 3.2.1 해상풍 모델

태풍모델에서 태풍 영향범위의 기압분포는 Myers and Malkin

(1961) 식에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$P(r) = P_c + \Delta P \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (11)$$

여기서,  $P(r)$ 은  $r$ 지점의 기압,  $P_c$ 는 중심기압,  $r$ 은 태풍중심으로부터의 거리,  $\Delta P$ 는 기압심도(대기압과 태풍 중심기압과의 차),  $r_0$ 는 태풍반경을 나타내며, 태풍중심으로부터 경도풍속이 최대가 되는 지점까지 거리로 정의된다. 식(11)에서 임의 지점의 기압  $P(r)$ 은 태풍중심으로부터 거리  $r$ 만의 함수로서 주어지며, 태풍모델은 동심원상의 등압선을 가정하게 된다. 한편, 경도 풍속  $U_1(r)$ 은 다음과 같다.

$$U_1(r) = -\frac{fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho_a} \frac{\partial P(r)}{\partial r}} \quad (12)$$

여기서,  $f$ 는 Coriolis 계수,  $\rho_a$ 는 공기밀도이다. 식(12)에서 태풍중심으로부터의 거리  $r$ 과 그 지점에서 법선방향의 기압경사  $\partial P/\partial r$ 이 주어지면 경도풍속  $U_1$ 은 다음 식으로 된다.

$$U_1(r) = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta P}{\rho_a} \frac{r_0}{r} \exp\left(\frac{r_0}{r}\right)} \quad (13)$$

태풍의 이동에 수반해서 발생하는 장소에서 바람  $U_2(r)$ 은 식(13)의 경도풍속  $U_1(r)$ 과 태풍의 진행속도  $V$ 에 비례하는 것으로 가정하면 다음과 같다.

$$U_2(r) = \frac{U_1(r)}{U_1(r_0)} V \quad (14)$$

태풍모델에 의한 해수면 마찰의 영향을 받지 않는 자유대기의 바람은 식(14)에서 구해진 경도풍속  $U_1(r)$ 과 바람  $U_2(r)$ 을 벡터적으로 합성하여 계산한다. 연안경계조건으로는 육상으로의 처오름을 고려하지 않았으며, 연안경계를 연직벽으로 가정하여 연안에 직각인 유량을 zero로 하였다.

### 3.2.2 폭풍해일 모형의 격자망 구성

폭풍해일 모형의 계산격자는 광역에서 협역으로 진행하면서 총 4개의 영역으로 구성하였으며, 격자크기 및 격자수는 Table 4와 같다. Fig. 1에 나타난 광역 격자망의 계산영역 Area\_1~Area\_3은 태풍발생 및 진행경로의 재현을 충분히 반영하기 위해 황해, 동해, 동중국해 등을 포함하는 영역으로 하였다. Fig. 2는 계산영역 Area\_4의 격자시스템을 나타낸다. 계산영역의 수심자료 및 해안선 자료는 국립해양조사원에서 발행한 수치해도를 기초로 하여 수치지형도 및 관측자료 등을 활용하였다.

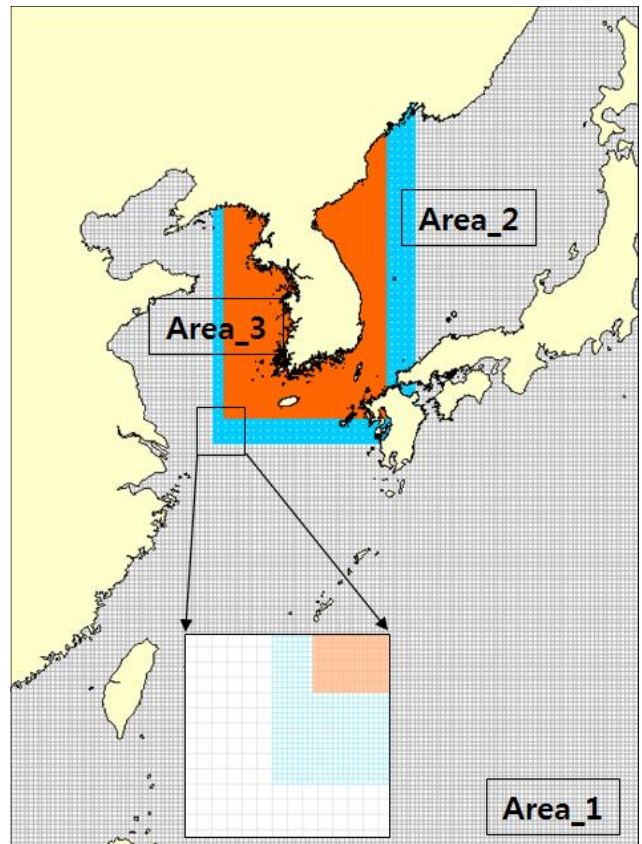


Fig. 1. Computational domain and grid system in the far field (Area-1 ~ Area-3).

Table 4. Grid of storm surge model

Study area	Resolution (m)	Number of grid points	Number of grid cells
Area_1	16,200	148×198	29,304
Area_2	5,400	142×241	34,222
Area_3	1,800	334×601	200,734
Area_4	900	151×267	40,317

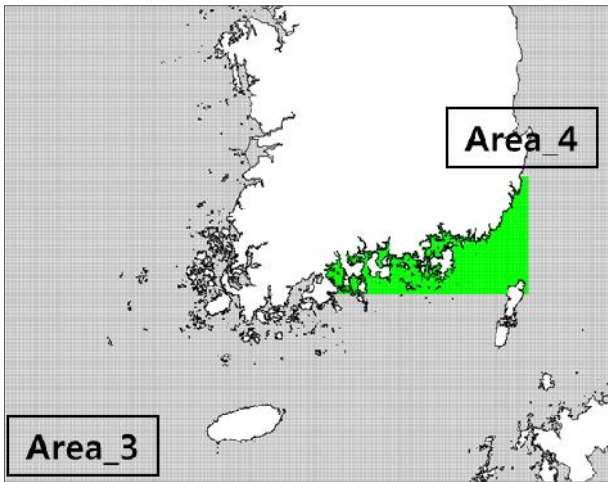


Fig. 2. Computational domain and grid system in the near field (Area-4).

### 3.2.3 태풍 매미의 이동 경로

본 연구대상인 태풍 매미는 2003년 9월 4일 괌 부근 해상에서 열대저기압으로 발달하여 북서쪽으로 진행하면서 2일 뒤인 9월 6일 15시경에 제14호 태풍 매미가 되었으며, 이동 경로는 Fig. 3과 같다. 9월 11일 09시경에 중심기압이 910 hPa로 가장 낮았으며, 우리나라 남해안에 상륙 당시 중심기압이 950 hPa로 위력이 강했으며, 순간최대풍속이 제주도 고산에서 60 m/sec를 기록하였다.

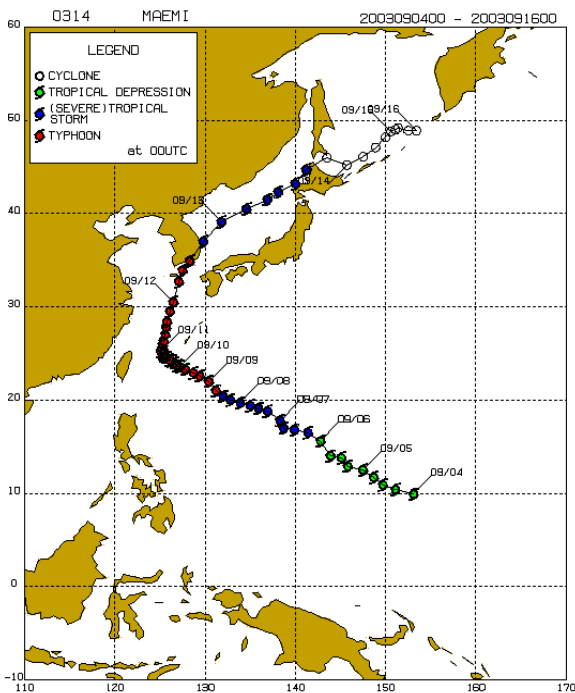


Fig. 3. Track of Typhoon Maemi.

## 4. 수치실험 결과

### 4.1 태풍 매미 통과 시 남해안 최대 해일고

국립해양조사원은 전국 연안에 설치된 조석관측소에서 실시간으로 조석관측을 실시하고 있으며, 1분 및 1시간 간격으로 관측자료를 제공하고 있다. 1분 자료의 경우 2002년 이후 디지털 장비가 보급된 후부터 관측자료가 제공되고 있으며, 그 이전 자료는 조석관측기록지에 기록된 아날로그 자료를 1시간 간격으로 취득하여 제공하였다. 태풍에 의해 발생한 해일고는 기존에 관측된 대상해역의 조석관측소에서 1분 및 1시간 자료를 이용하여 해일고 분석을 실시한 자료이다. 해일고 분석방법은 관측된 자료를 조화분해하여 구한 예보치와 관측치를 비교하여 태풍 영향기간의 편차를 해일고로 취한 값이다. 태풍 매미의 주요 영향권역내에 있는 국립해양조사원 조석관측소의 관측기록으로부터 추출한 해당 지역의 최대 해일고를 Table 5에 제시하였다.

Table 5. Peak storm surge during the passage of typhoon Maemi

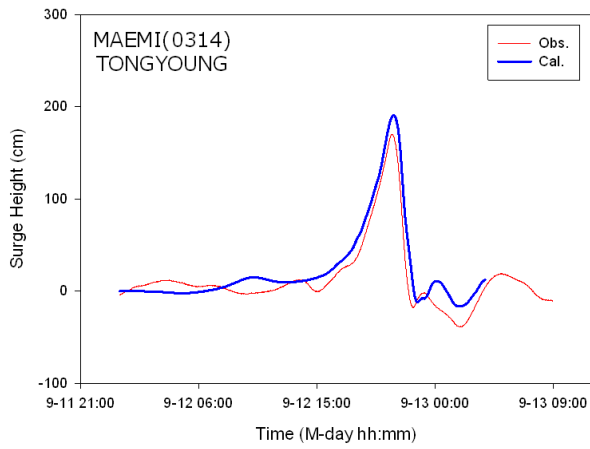
Surge type	Busan	Gadeok do	Tong-yeong	Ulsan	Jeju-do	Seogwi po	Yeosu
Peak Storm surge (cm)	73	54	170	53	49	162	259

### 4.2 폭풍해일고 검증

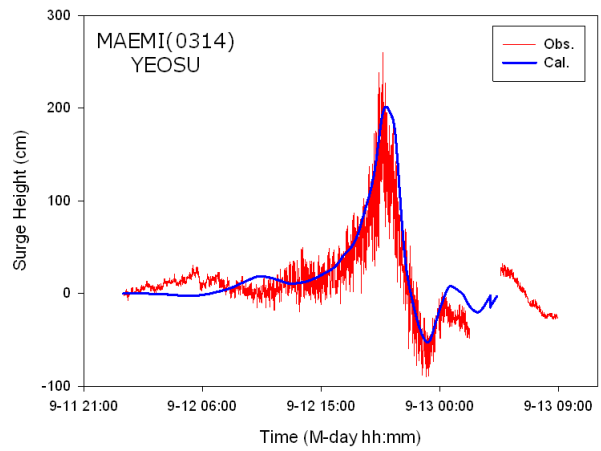
태풍 매미로 인한 폭풍해일고를 검증하기 위해 일본 및 우리나라 기상청의 태풍자료를 활용하였으며, 국립해양조사원의 조석관측기록과 비교·검증하였다. 수치모형 실험결과와 비교·검증은 계산결과와 함께 태풍 매미 통과 시 대상해역(통영, 여수, 마산, 부산, 제주, 서귀포)에서 1분 간격으로 관측된 수위 자료로부터 추출한 폭풍해일 관측자료를 이용하였다. Fig. 4는 태풍 매미 통과 시 부산항, 여수항, 통영항, 마산항, 제주항 및 서귀포항에서 해일고의 계산치와 관측치의 시계열을 비교하였다. 각 지점에서 계산치와 관측치의 시계열을 비교한 결과, 해일고의 크기 뿐만 아니라 최대 해일고가 발생하는 시간도 잘 일치하는 것으로 판단된다. 폭풍해일고는 마산항에서 약 230 cm로 가장 크게 나타났으며, 여수항과 통영항에서는 약 200 cm, 부산항에서는 약 75 cm로 나타났다.

### 4.3 최대해일고의 광역 분포

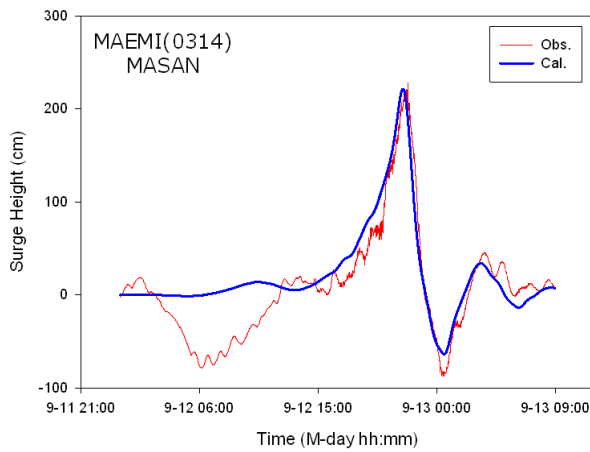
Fig. 5는 태풍 매미 통과 시 광역(Area-2)에서 최대해일고의 공간분포를 나타낸다. 동해안에서는 약 30 cm 정도이고, 태풍 매미가 통과했던 남해안에서는 약 1.2 m 이상의 해일고를 기록하였다.



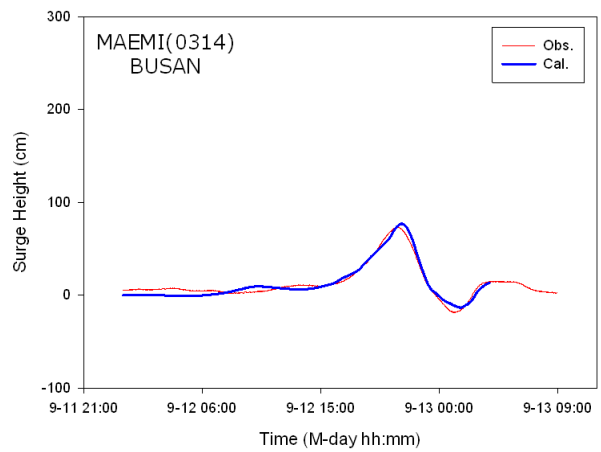
(a) Tongyeong



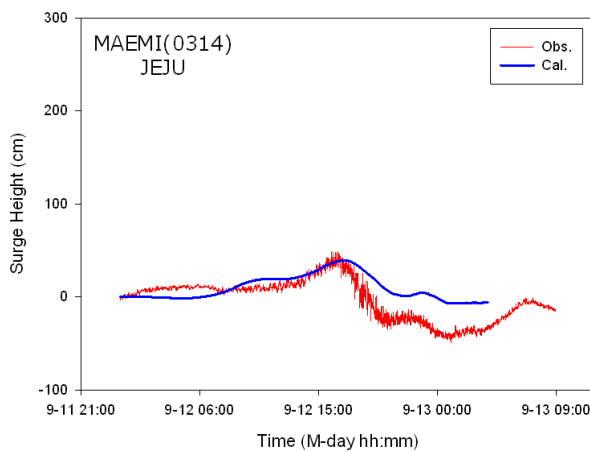
(b) Yeosu



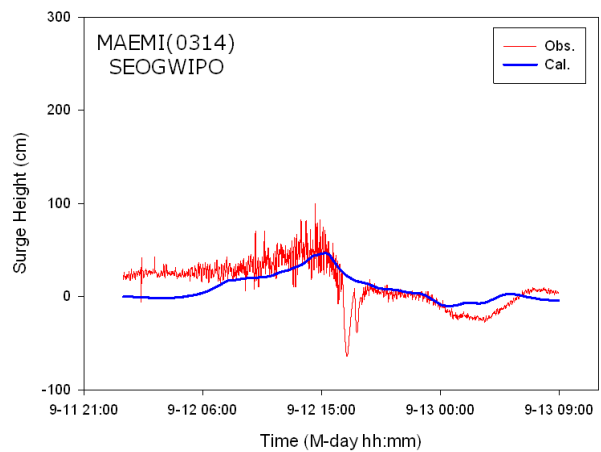
(c) Masan



(d) Busan



(e) Jeju-do



(f) Seogwipo

Fig. 4. Comparisons of simulated and measured storm surges during the typhoon Maemi.

부산 연안에서 태풍에 의한 폭풍해일의 수치모델링

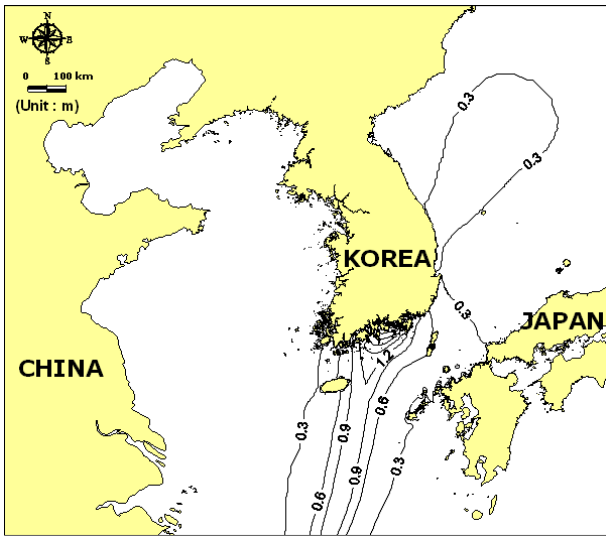


Fig. 5. Simulated peak storm surges during the passage of the typhoon Maemi.

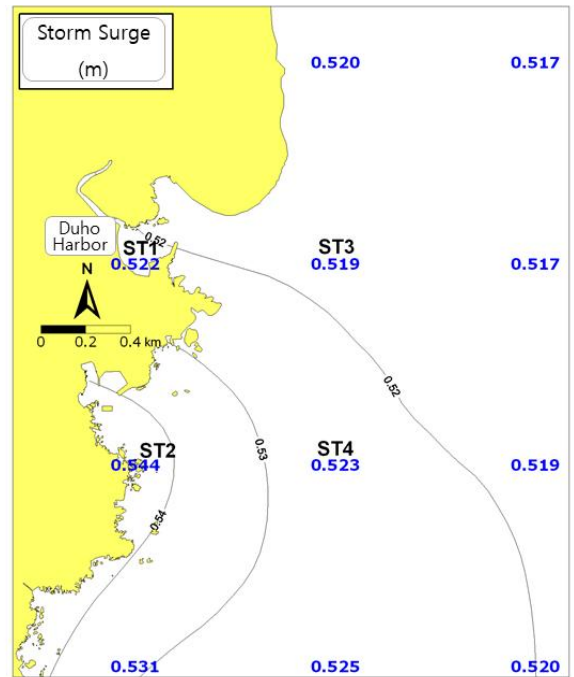
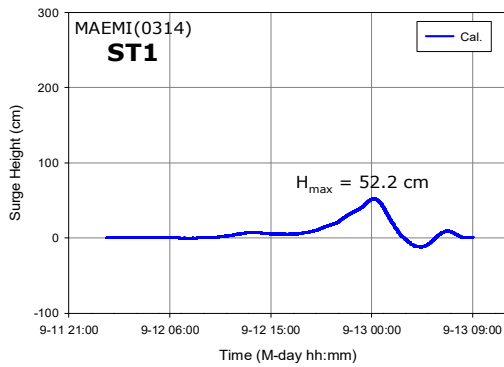
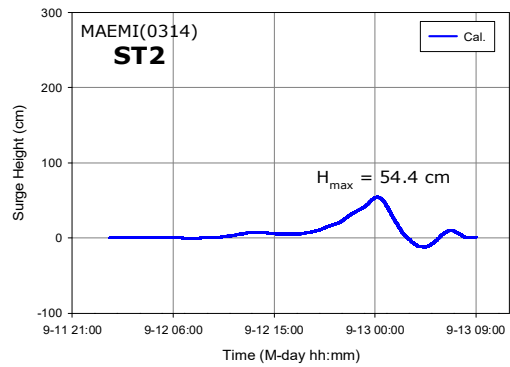


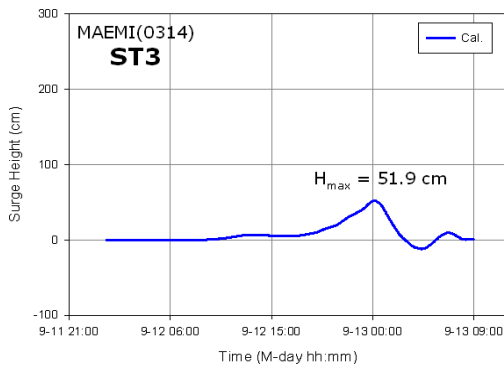
Fig. 6. Computational points of time series and isolines of peak storm surge on the east coast of Busan.



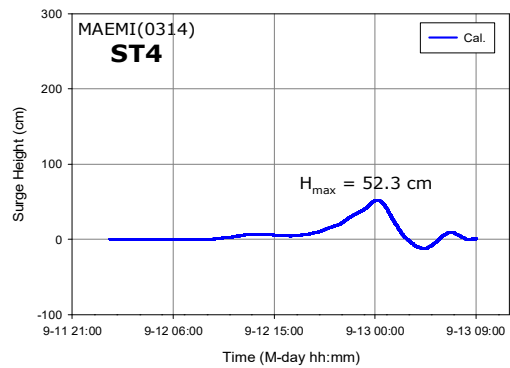
(a) ST1



(a) T2



(a) ST3



(a) ST4

Fig. 7. Time series of storm surge at ST1 ~ ST4 during the passage of the typhoon Maemi.



#### 4.4 부산 동부 연안 해일고

태풍 매미 통과 시 폭풍해일 수치모형을 통해 검증된 자료를 근거로 하여 협역인(Area\_4) 부산 동부 연안의 태풍해일고를 산정하였다. Fig. 6은 부산 동부 연안에서 폭풍해일고의 시계열 계산위치도 및 최대 등해일고를 나타낸다. 부산 동부 연안에서 최대 해일고는 약 52~55 cm 범위인 것으로 나타났다. Fig. 7은 부산 동부 연안에서 해일고의 시계열변화를 나타낸 것이다. 수치계산결과에 의하면 최대 해일고는 정점 ST1에서 52.2 cm, 정점 ST2에서 54.4 cm, 정점 ST3에서 51.9 cm, 정점 ST4에서 52.3 cm이었다. 부산 동부 연안에서 최대 해일고는 부산항의 해일고보다 약 20 cm 작게 나타났으며, 연안에서 외해로 갈수록 해일고는 감소하였다. 이것은 부산 동부 연안은 부산항에 비해 외해로 개방돼 있기 때문에 해일고가 작게 나타난 것으로 생각된다. 이와 같은 결과로부터 태풍 통과 시 거의 폐쇄되거나 반폐쇄된 만 내에서는 해일고의 상승으로 인한 해안도시의 침수범람 피해가 크게 발생할 것으로 사료된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 연안도시 침수 예경보 시스템 구축 일환으로 2003년 태풍 매미 통과 기간 중에 부산 연안에서 시간별 폭풍해일 특성을 해석하였다. 태풍 매미 통과시 부산항, 여수항, 통영항, 마산항, 제주항 및 서귀포항에서 관측된 폭풍해일고와 계산된 해일고의 시계열을 비교하였다. 각 지점에서 태풍 해일고 시계열을 비교한 결과, 해일고의 크기 뿐만 아니라 최대해일고가 발생하는 시기도 잘 일치하였다. 태풍해일고는 마산항에서 약 230 cm로 가장 크게 나타났으며, 여수항과 통영항에서는 약 200 cm, 부산항에서는 약 75 cm로 나타났다. 수치모형실험결과, 부산동부 연안 해역에서 최대 해일고는 52~55 cm 범위로 부산항보다 약 20 cm 정도 작게 나타났으며, 연안에서 외해로 갈수록 해일고는 감소하였다. 이것은 부산 동부 연안이 부산항에 비해 외해로 개방돼 있기 때문에 해일고가 작게 나타난 것으로 보이며, 이와 같은 결과로부터 거의 폐쇄되거나 반폐쇄된 만 내에서는 해일고 상승으로 인한 해안도시의 침수범람 피해가 크게 발생할 것으로 사료된다.

### References

- [1] Choi, B. H., H. M. Eum, H. S. Kim, W. M. Jeong, and J. S. Shim(2004), Wave-tide-surge coupled simulation for typhoon Maemi, Special Workshop of Waves and Storm Surges around Korean Peninsula, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, pp. 121-144.
- [2] Fairley, I., I. Masters, and H. Karunarathna(2016), Numerical Modelling of Storm and Surge Events on Offshore Sandbanks, Marine Geology, No. 371, pp. 106-119.
- [3] Hur, D. S., H. W. Lee, W. D. Lee, and K. S. Bae(2008), Storm Surge Height on Busan and Gyeongnam Coastal Region by an Attack of Super-Typhoon, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 20, No. 1, pp. 128-136.
- [4] Kang, J. W., S. J. Park, and M. W. Park(2008), Rising Tendencies of Both Tidal Elevation and Surge Level at the Southwestern Coast, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 20, No. 1, pp. 14-24.
- [5] Kang, T. S., S. R. Moon, S. Y. Nam, and J. S. Shim(2010), The Vulnerability of the Reclaimed Seashore Land Attendant Upon Storm Surge/Coastal Inundation, Journal of ocean engineering and technology, Vol. 24, No. 1, pp. 68-75.
- [6] Kawai, H., K. Kawaguchi, and N. Hashimoto(2004), Development of Storm Surge Model Coupled with Wave Model and Hindcasting of Storm Waves and Surges Caused by Typhoon 9918, Proceeding of ISOPE 2004.
- [7] Kawai, H., D.-S. Kim, Y.-K. Kang, T. Tomida, and T. Hiraishi(2005), Hindcasting of Storm Surges in Korea by Typhoon 0314 (Maemi), Proceeding of ISOPE 2005, pp. 446-453.
- [8] Kim, T.(2021), Development of New Typhoon Rating to Predict Magnitude of Damage, Journal of Korean Society Hazard Mitigation, Vol. 21, No. 5, pp. 252-161.
- [9] Kim, C.-K. and J. T. Lee(2007), Storm Surge Hindcast Using a Three-Dimensional Numerical Model, 21th annual conference of PACON 2007.
- [10] Kim, C.-K. and J. T. Lee(2011), Hindcast of Storm Surge in the Southeastern Coast Using a Three-Dimensional Numerical Model, Journal of The Korean Society of Civil Engineers, Vol. 31, No. 4B, pp. 369-376.
- [11] Kim, C.-K., J. T. Lee, and H. K. Jang(2010), Inundation Numerical Simulation in Masan Coastal Area, Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 43, No. 11, pp. 985-994.
- [12] KMA(1986), Typhoon White Book.
- [13] Lee, J.-C., K.-C. Jun, K.-S. Park and J.-I. Kwon(2007), Hindcast of the Storm Surge, Typhoon Maemi, 21th annual conference of PACON 2007.
- [14] Myers, V. A. and W. Malkin(1961), Some Properties of

Hurricane Wind Fields as Deduced from Trajectories, U.S. Weather Bureau, National Hurricane Research Project, Report 49.

- [15] Wang, X., T. Yan, and Q. Hu(2005), An Application of Numerical Simulation and Correlation Method to Calculate Storm Surge Elevations with Certain Return Years, Proceeding of ISOPE 2005, pp. 454-458.
- [16] Watanabe, A. and H. Shibaki(2002), Study of Multi-Level Simulation Model for Storm Surge Considering Density Stratification and Wave Setup, JSCE Journal of Hydraulic, Coastal and Environmental Engineering, No. 719/II-61, pp. 47-66.
- [17] Westerink, J. J., R. A. Luetlich, A. M. Baptista, N. W. Scheffner, and P. Farrar(1992), Tide and Storm Surge Predictions Using Finite Element Model, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 118, No. 10, pp. 1373-1390.
- [18] Yeh, S. -P., B. C. Lee, D. -J. Doong, C. -L. Kuo, and C. C. Kao(2005), The Coastal Hazards Warning System Based on the Operational Wave and Storm Surge Models, Proceeding of ISOPE 2005, pp. 440-445.

---

Received : 2023. 10. 12.

Revised : 2023. 11. 09.

Accepted : 2023. 12. 29.