

자 료

슈퍼태풍 내습 시 부산·경남 연안역의 폭풍해일고
Storm Surge Height on Busan and Gyeongnam coastal region
by an Attack of Super-Typhoon

허동수* · 이현우** · 이우동** · 배기성*

Dong Soo Hur*, Hyeon Woo Lee**, Woo Dong Lee** and Ki Sung Bae*

요 지 : 최근, 전 세계적으로 지구 온난화가 가속화됨에 따라 해수면의 온도가 상승함과 동시에 태풍의 강도도 커지고 있는 실정이다. 우리나라의 경우에도 태풍을 연구하는 많은 학자들이 머지않은 미래에 슈퍼태풍이 내습할 것으로 예측하고 있다. 따라서 본 연구에서는 태풍 Maemi의 이동경로에 미국을 강타한 허리케인 Katrina(미국 뉴올리언스, 2005)와 태풍 Durian(필리핀, 2006) 및 태풍 Vera(일본 이세만, 1959)의 태풍특성(중심기압, 최대풍속반경, 이동속도 등)을 조합하여 수치시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과, 부산·경남 연안역 대부분의 지점에서 Maemi의 경로에 Durian과 Vera를 진행시킨 경우, Maemi 내습 시보다 약 1.5~2.0배 높은 폭풍해일고를, Katrina의 경우, 약 4.0배 이상의 높은 폭풍해일고를 나타내었다. 이상과 같은 최대폭풍해일고의 수치로서 슈퍼태풍의 위험성을 충분히 인지하여 최적의 방재시스템을 구축하는 것이 폭풍해일의 재해예방 및 최소화를 위하여 조속히 해결하여야 할 과제이다.

핵심용어 : 슈퍼태풍, 태풍 매미, 허리케인 카트리나, 수치시뮬레이션, 폭풍해일고, 방재대책

Abstract : Recently, the unusual climate change is happening from the global warming in the whole world, the Korean peninsula is also no exception. It is predicted by many researchers that, in the near future, the Super-Typhoon of overwhelming power will occur due to rising temperatures on the sea surface around the Korean peninsula. In this study, numerical simulation has been performed with the Super-Typhoons which combined route of Typhoon Maemi with typhoon conditons of Hurricane Katrina (New Orleans in U.S.A, 2005), Typhoon Durian (Philippine, 2006) and Typhoon Vera (Ise Bay in Japan, 1959) at Busan and Gyeongnam coastal area which has been badly damaged due to storm surge every year. From the numerical results, it is revealed that the storm surge heights of the Super-Typhoons are higher than that of Maemi, specially the storm surge height in the case of Katrina is about 4 times larger. So, it can be pointed out that the construction of countermeasures against disasters are very important in order to prepare against an attack of the Super-Typhoons.

Keywords : super-typhoon, typhoon maemi, hurricane katrina, numerical simulation, storm surge height, countermeasures against disasters

1. 서 론

최근, 전 세계적으로 지구 온난화가 가속화됨에 따라 해수면의 온도가 상승함과 더불어 태풍의 강도가 커지고 있다. 대표적인 예로, 지난 2005년 미국 뉴올리언스로 상륙

하여 1,300명 이상의 사망자와 1,000억 달러 이상의 경제적 손실을 발생(高橋重雄ら, 2006)시킨 허리케인 Katrina와 2006년 필리핀을 내습하여 사망자 734명과 부상자 2,360명 및 실종자 762명의 인명피해와 약 1200억 달러의 막대한 경제적 손실을 발생(필리핀 국가재난방재위원회

*경상대학교 토목환경공학부 해양산업연구소(Corresponding author : Dong Soo Hur, Institute of Marine Industry, Department of Civil and Environmental Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, 650-160, Korea, dshur@nongae.gsnu.ac.kr)

**경상대학교 토목환경공학부(Department of Civil and Environmental Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, 650-160, Korea)

회, 2006)시킨 태풍 Durian 등이 있으며, 과거 막대한 피해를 입힌 태풍으로서 1959년 일본 이세만을 강타하여 5,000여명의 사망자를 발생(宇多高明ら, 1994)시킨 태풍 Vera 등이 있다.

여기서, 허리케인 Katrina는 슈퍼태풍의 위력으로 미국 뉴올리언스에 상륙하였고, 이러한 슈퍼태풍은 태풍중심의 최대풍속이 130 kt(67 m/s)이상, 하루 1000 mm이상의 폭우를 동반하는 태풍으로 정의하고 있으며(JTWC, 미국합동태풍정보센터), 태풍 Durian과 Vera도 슈퍼태풍급의 규모로 내륙에 내습하였다.

우리나라의 경우, 2003년 남해 동부 연안역을 강타해 막대한 피해를 입힌 태풍 Maemi를 시작으로 머지않은 미래에 슈퍼태풍이 내습할 것으로 기상학 및 해양학 등 태풍에 관련된 학문을 전공하는 학자들이 예측하고 있으나, 이에 대한 대책마련에 있어서는 거의 논의가 이루어지고 있지 않는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 폭풍해일의 피해에 가장 많이 노출되어 있는 남해동부의 부산 연안역과 경남 연안역을 대상으로 하여 슈퍼태풍이 내습할 경우의 수치시뮬레이션을 실시하여 위험성에 대해 검토하려고 한다.

우선, 지난 2003년 부산·경남 연안역에 막대한 피해를 입혔을 뿐만 아니라 과거 태풍 중 태풍규모와 재해규모 면에서 각종 기록을 경신한 태풍 Maemi를 대상으로 폭풍해일고를 산정하였으며, 다음으로 태풍 Maemi의 이동 경로에 Katrina, Durian, Vera의 태풍특성(중심기압, 최대 풍속반경, 이동속도 등)을 조합하여, 가상의 슈퍼태풍에 의한 폭풍해일고의 특성을 비교·검토함으로써 머지않은 미래에 내습할 것으로 예측되는 슈퍼태풍에 대한 위험성을 인지하고 사전준비 및 방지책의 강구를 촉구하고자 한다.

2. 수치계산수법

2.1 바람장 추산모델의 기초방정식

태풍중심 부근의 기압분포는 동심원으로 근사할 수 있기 때문에 이러한 특징을 이용하여 태풍의 기압분포를 가정하는 방법을 일반적으로 태풍 모델이라고 칭하며, 태풍 기압분포 추정식으로는 주로 Myers and Malkin(1961)의 분포식 (1)이 이용되고 있다.

$$p_r = p_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (1)$$

여기서, Δp 는 기압심도, p_c 는 태풍의 중심기압, p_r 은 태

풍의 중심으로부터 r 만큼 떨어진 점에서의 기압, r_0 는 태풍반경으로 태풍중심으로부터 최대풍속반경지점까지의 거리를 나타내는 파라미터이다.

태풍의 중심위치 및 태풍권내의 등압선 정보로부터, Δp 와 r_0 가 구해지면, 임의지점에서의 기압분포가 식 (1)에 의해 계산되고, 이로부터 태풍을 중심으로 하는 대칭풍(경도풍)의 풍속, 태풍의 이동에 의해 발생하는 풍속, 이 두 개를 합성한 풍속이 각각 다음과 같이 추산된다.

태풍의 중심부는 주변에 비해 기압이 낮아 그 기압차로 인해 바람이 불게 되며, 지구가 자전으로 인해 북반구에서는 오른쪽 방향으로 힘(Coriolis Force)이 작용한다. 이로 인하여 태풍의 중심주변으로 반시계방향으로 부는 경도풍이 발생한다. 해면에 있어서 마찰의 영향을 받지 않는 상공에서의 풍속 U_{gr} 은 기압경도력, 원심력 및 Coriolis Force의 평형으로부터 다음의 식과 같이 주어진다.

$$\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial p_r}{\partial r} = \frac{U_{gr}^2}{r} + fU_{gr} \quad (2)$$

여기서, r 은 등압선의 곡률반경이다.

Myers and Malkin(1961)의 분포식 (1)에 의한 기압분포를 가정한 다음 식 (2)를 풀면 다음의 식 (3)이 얻어진다.

$$U_{gr} = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta p r_0}{\rho_a r} \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right)} \quad (3)$$

경도풍의 풍속 U_{gr} 로부터 해상풍의 풍속 U_1 으로 환산하기 위한 식은 다음과 같다.

$$U_1 = C_1 U_{gr} \quad (4)$$

여기서, C_1 은 경도풍에서 해상풍으로의 보정계수(저감율)이고 폭풍해일의 추산치와 일치하도록 산정되는 경험치는 0.6~0.7정도(紫木, 2004)의 값을 가지며, 본 연구에서는 0.67을 적용하였다. 또한, 해상풍의 풍향에 관해서는 경도풍의 풍향이 저압부에 편향하도록 반시계방향으로 30°(紫木, 2004)정도 변화시켰다.

태풍의 이동에 의해 발생하는 풍속 U_2 는 다음 식 (5)로 표현된다.

$$U_2 = C_2 \frac{U_{gr}(r)}{U_{gr}(r_0)} V_T \quad (5)$$

여기서, V_T 는 태풍의 진행속도이며, C_2 는 비례정수로서 도상 식 (5)의 보정계수 C_1 과 같거나 그 이상의 값을 갖는다. U_2 의 방향은 태풍의 진행속도와 동일하다.

이상으로부터 파랑추산에 이용되는 합성풍의 풍속과 풍향은 식 (4)와 식 (5)의 벡터합의 크기와 방향을 이용한다.

2.2 폭풍해일고 추산모델의 기초방정식

본 연구에 이용된 기초방정식은 다음의 연속식 (6)과 운동방정식 (7)-(9)로 구성된다.

$$\frac{du}{dx} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{du}{dt} = fv - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (7)$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial y} + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (8)$$

$$\frac{dw}{dt} = -g - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (9)$$

여기서, x, y 는 수평방향을, z 는 수직방향을 나타내는 좌표계이고, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 유속성분이다. 그리고 f 는 Coriolis계수, ρ_w 는 해수의 밀도, p 는 수압, A_h 와 A_v 는 수평 및 연직의 와동점성계수, g 는 중력가속도이다. η 는 폭풍해일에 의한 수면변위이다.

식 (6)을 해저 $z = -h$ 에서 해면 $z = \eta$ 까지 적분하면 다음의 식 (10)을 얻는다.

$$\frac{d\eta}{dt} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

여기서, N, M 은 다음의 식 (11)과 같이 나타내며, D 는 기본수심 h 와 폭풍해일에 의한 수면변위 η 를 합한 전수심이다.

$$\begin{aligned} M &= \int_{-h}^{\eta} u dz = U(h + \eta) = UD \\ N &= \int_{-h}^{\eta} v dz = V(h + \eta) = VD \end{aligned} \quad (11)$$

식 (9)를 z 방향에 대해서 적분하면 다음의 식이 얻어진다.

$$p = \rho_w g (\eta - z) + p_0 \quad (12)$$

여기서, p_0 는 수면에서의 기압이다.

식 (12)를 식 (7) 및 (8)에 대입하여 해저 $z = -h$ 에서 해면 $z = \eta$ 까지 적분하면 다음의 식 (13)과 (14)가 얻어진다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right)$$

$$= fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\ &= -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, τ_{sx} 와 τ_{sy} 및 τ_{bx} 와 τ_{by} 는 해면 및 해저에서 x, y 방향에 대한 각각의 전단력이며, 다음의 식 (15)와 (16) 및 식 (17)과 (18)로 나타내어진다.

$$\tau_{sx} = \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (15)$$

$$\tau_{sy} = \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (16)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (17)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (18)$$

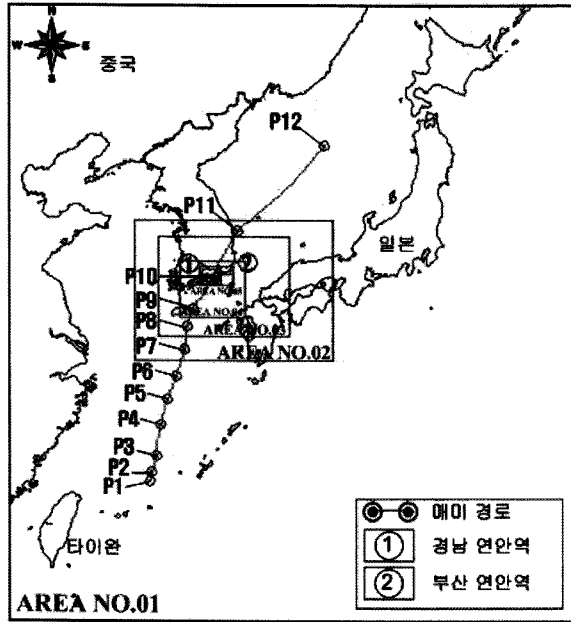
여기서, ρ_a 는 대기밀도, W_x 와 W_y 는 해면상 10 m에서 각각 x, y 방향으로의 풍속, n 은 Manning의 조도계수이다. 식 (15)와 식 (16)에 포함되는 해면저항계수(항력계수)에 대해서는 아직까지 검토해야 할 요소가 많이 존재하며, 이러한 해면저항계수를 조절함으로써 과거에 내습한 폭풍해일 고를 높게 재현할 수 있으나, 폭풍해일고의 예측적인 측면에서는 어떠한 값을 이용해야 할지 아직 불명확한 상태이다. 따라서 이와 관련된 많은 경험값이 제안되어 있지만, 본 연구에서는 Mitsuyasu and Kusaba(1984)에 의한 제안식을 사용하였다.

$$C_D = \begin{cases} (1.290 - 0.024W)/10^3 & (W < 8) \\ (0.581 - 0.063W)/10^3 & (W \geq 8) \end{cases} \quad (19)$$

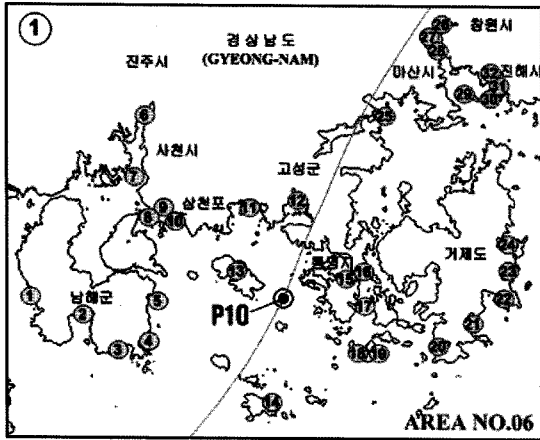
이상과 같은 폭풍해일의 시뮬레이션을 위해서는 연속식 (10)과 비선형 장과 방정식 (13) 및 (14)를 동시에 수치적으로 풀어야하며, 이에 대한 수치기법으로 유한차분법을 적용하였다.

2.3 계산대상영역 및 태풍의 조건

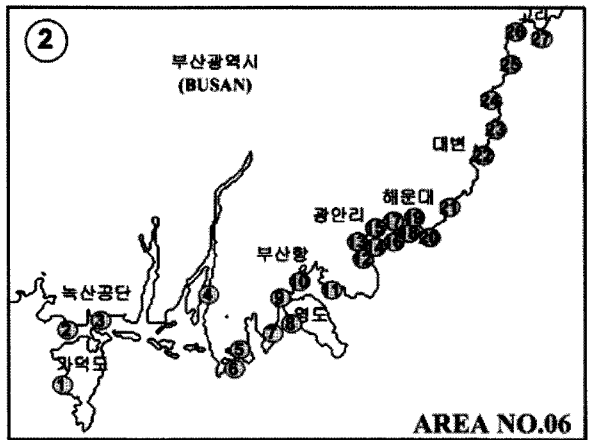
폭풍해일 시뮬레이션의 대상영역은 Fig. 1(a)의 태풍경로(태풍 Meami)를 포함하기 위해 한국과 일본 그리고 태평양을 포함하는 광역으로 구성하였으며, 대상영역인 경남 연안역과 부산 연안역을 (b)와 (c)에 자세히 나타내었다.



(a) Wide area



(b) Gyeongnam coast



(c) Busan coast

Fig. 1. Area of storm surge simulation and the route of typhoon Maemi.

대상영역에서의 계산정도를 높이기 위하여 계산영역을 제1영역에서 제6영역까지 Nesting하여 계산을 수행하였다. 계산격자의 구성은 제1영역에서의 격자의 크기는 32.4 km 이고, 순차적으로 16.2 km, 5.4 km, 1.8 km, 600 m로 구성하였으며, 대상영역인 제6영역 즉, 경남 연안역과 부산 연안역에서는 격자간격을 200 m로 구성하였다.

Fig. 1(a)로부터 태풍 Maemi의 경로를 살펴보면, 경남 사천부근으로 상륙, 북북동진하여 경남 함안을 거쳐 경북

울진해안을 통해 동해상으로 이동한 태풍으로서, 남부 연안역을 통과하는 대표적인 정상 진행경로라는 것을 알 수 있다. 그리고 지점별 최대폭풍해일고의 비교를 위하여 경남 연안역의 32개 지점과 부산 연안역의 27개 지점을 (b)와 (c)에 각각 나타내었다.

본 연구에서는 과거 우리나라에 큰 피해를 입힌 태풍 Maemi와 조합하여 가상의 슈퍼태풍 Katrina, Durian, Vera에 대해서도 수치시뮬레이션을 수행하였으며, 계산에 이용된

Table 1. Typhoon conditions used in storm surge simulation

태 풍	정 보	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Maemi	기압심도(hPa)	0.0	46.5	83.0	73.0	68.0	68.0	68.0	68.0	68.0	63.0	43.0	33.0
	최대풍속반경(km)	38.0	38.0	38.0	40.0	40.0	38.0	38.0	50.0	55.0	50.0	90.0	110.0
	이동속도(km/hr)	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	35.0	40.0	40.0	45.0	45.0	45.0
Vera	기압심도(hPa)	108.0	105.5	103.0	103.0	98.0	93.0	93.0	93.0	83.0	73.0	48.0	31.0
	최대풍속반경(km)	68.0	68.5	69.0	65.0	65.0	65.0	65.5	66.0	73.0	80.0	124.0	201.0
	이동속도(km/hr)	14.7	25.3	35.8	28.4	30.0	31.6	37.5	43.3	51.1	58.9	83.7	81.2
Durian	기압심도(hPa)	48.0	55.5	63.0	88.0	93.0	98.0	93.0	88.0	80.5	73.0	73.0	53.0
	최대풍속반경(km)	33.0	42.0	51.0	52.0	53.5	55.0	63.0	71.0	83.5	96.0	134.0	220.0
	이동속도(km/hr)	24.8	26.5	28.2	23.9	20.2	16.4	17.3	18.2	16.4	14.5	18.1	21.7
Katrina	기압심도(hPa)	83.0	93.5	104.0	111.0	109.5	108.0	104.0	100.0	95.0	90.0	65.0	35.0
	최대풍속반경(km)	33.0	42.0	51.0	52.0	53.5	55.0	63.0	71.0	83.5	96.0	134.0	220.0
	이동속도(km/hr)	15.4	18.4	21.4	18.7	38.2	19.5	19.6	19.7	22.0	24.2	29.8	29.0

Table 2. Route of typhoon Maemi used in storm surge simulation

Point	시간(년, 월, 일, 시, 분)	경도(°E)	위도(°N)
P1	0309111500	125.300	25.900
P2	0309111800	125.400	26.300
P3	0309112100	125.600	27.000
P4	0309120300	125.800	28.400
P5	0309120600	126.100	29.500
P6	0309120900	126.500	30.500
P7	0309121200	126.900	31.700
P8	0309121500	127.000	32.700
P9	0309121700	127.300	33.500
P10	0309122100	128.300	34.800
P11	0309130300	129.700	36.900
P12	0309131500	134.800	40.500

태풍정보의 자세한 사항은 Table 1과 Table 2에 나타나 있다.

여기서, Katrina와 Durian에 대한 최대풍속반경을 산출하기에 자료가 충분하지 않아 과거 우리나라를 내습한 태풍 중 가장 큰 최대풍속반경을 가진 태풍 Sarah의 최대풍속반경을 이용하였다. 또한, 각 태풍의 상륙시점을 Maemi의 상륙시점과 동일하게 하여 시물레이션을 수행하였다.

2.4 수치시물레이션을 타당성 검증

본 연구의 수치시물레이션에 대한 타당성은 이전의 연구(허 등, 2006a; 허 등, 2006b)에서, 태풍 Maemi를 대상으로 하여 대상영역인 부산·경남 연안역에 위치한 부산항 검조소와 마산항 검조소 및 통영 검조소에서의 관측치와 본 수치시물레이션의 계산치의 비교를 통하여 본 수치모델의 타당성을 검증하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 최대폭풍해일고의 분포

Fig. 2는 부산 연안역의 최대폭풍해일고의 공간분포도이며, Table 1에 나타내고 있는 각각의 태풍에 대해 추산된 최대폭풍해일고(조위편차)를 나타내고 있다. (a)의 태풍 Maemi는 부산과 경남을 위험 반원상에 두고 진행한 관계로 부산·경남 연안역에 과거 내습했던 주요 태풍(Sarah, Thelma, Maemi)중에서 가장 높은 폭풍해일고를 나타내고 있는 것이 보고되어 있다(허 등, 2006a; 허 등, 2006b). (b)의 태풍 Vera의 경우, Maemi 내습 시보다 40~90 cm 높은 폭풍해일고가 발생하였으며, (c)의 태풍 Durian 및 (d)의 태풍 Katrina의 경우, Maemi 내습 시보다 각각 30~60 cm 및 150~440 cm 정도 높은 폭풍해일고가 발생하였다.

Fig. 3은 경남연안역의 최대폭풍해일고의 공간분포도를 나타내고 있다. (a)는 태풍 Maemi 내습 시의 최대폭풍해일고를 (b)는 태풍 Vera, (c)는 태풍 Durian, (d)는 Katrina의 경우를 각각 나타내고 있다. 태풍 Maemi 내습 시에 비해 Vera와 Durian은 각각 90~120 cm 및 80~100 cm 정도 높은 최대폭풍해일고를 나타내고 있으며, 태풍 Katrina의 경우는 Maemi의 경우에 비해 120~570 cm정도나 높은 폭풍해일고가 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

태풍 Maemi 내습 시의 피해가 어느 정도였는지를 감안한다면, 이상과 같은 대략적인 최대폭풍해일고의 분포도로도 슈퍼태풍의 위험성을 충분히 인지할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 최대폭풍해일고의 비교

부산·경남 연안역의 지역적 특성에 따른 폭풍해일고의

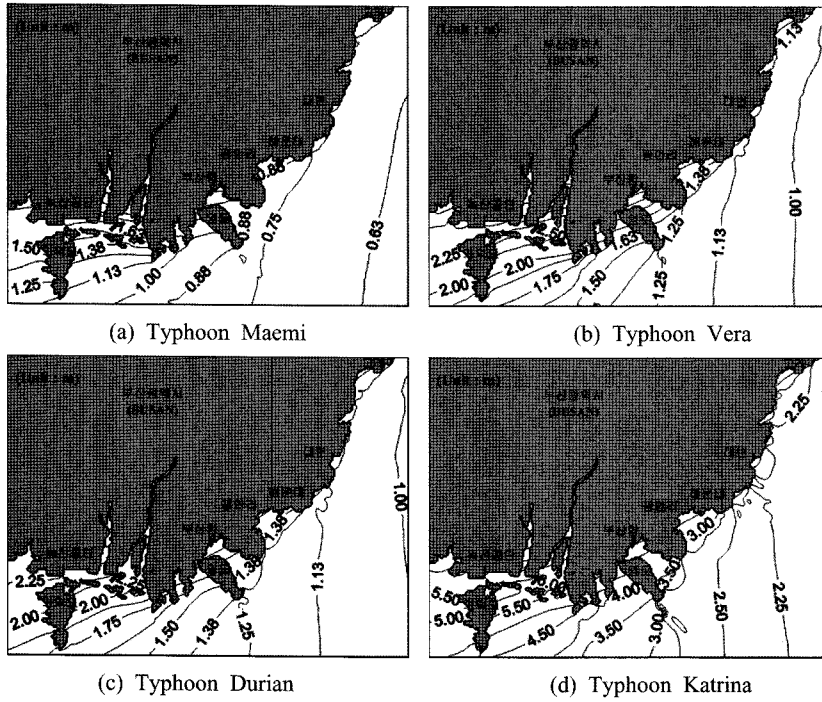


Fig. 2. Distribution of maximum storm surge height at Busan coast.

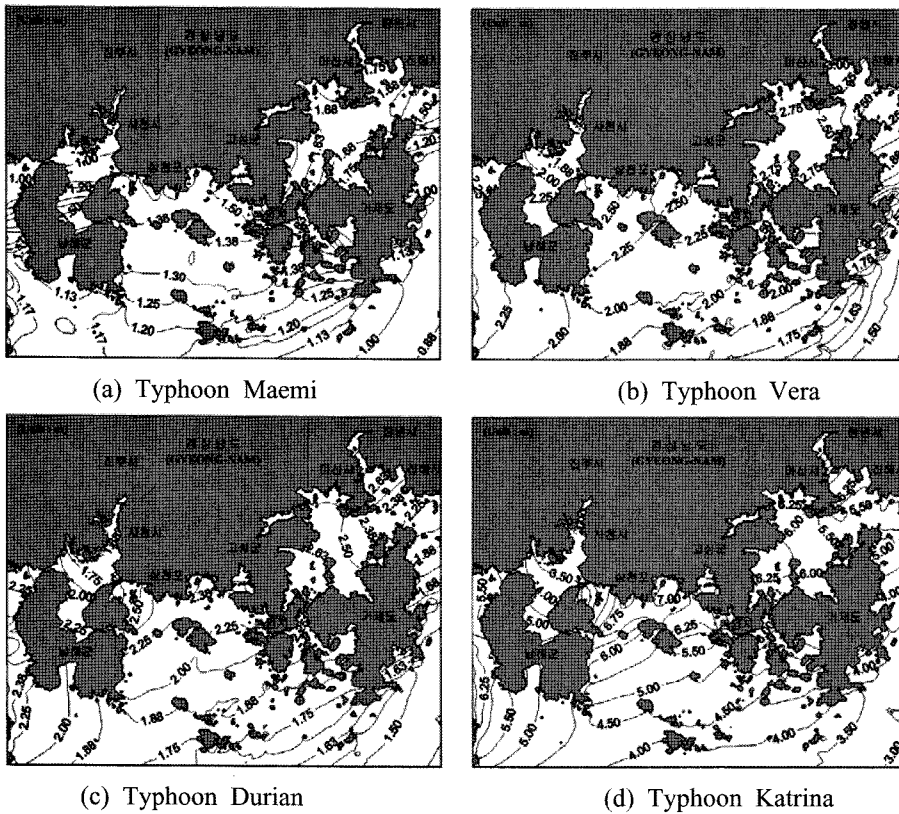
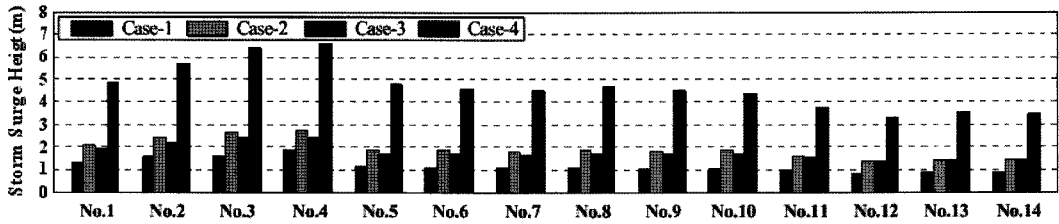
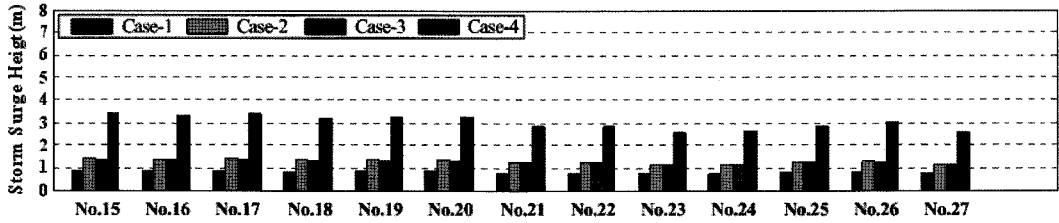


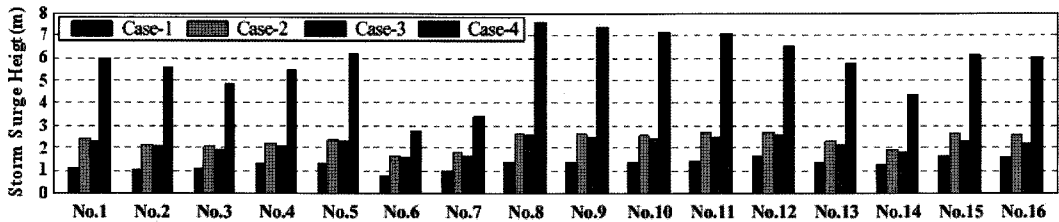
Fig. 3. Distribution of maximum storm surge height at Gyeongnam coast.



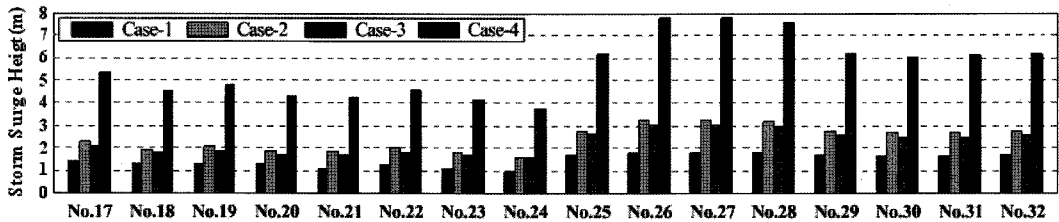
(a) Western side at Busan coast(No.1~No.14)



(b) Eastern side at Busan coast(No.15~No.27)



(c) Western side at Gyeongnam coast(No.1~No.16)



(d) Eastern side at Gyeongnam coast(No.17~No.32)

Fig. 4. Comparison of maximum storm surge height according to the Typhoon.

변동양상을 검토하기 위하여, Fig. 1(b)에 나타난 것과 같이 경남 연안역의 32개 지점과, Fig. 1(c)에 나타난 부산 연안역의 27개 지점에서 폭풍해일고의 시간과형을 계산한 후, 이를 이용하여 최대폭풍해일고를 산출하였다. Fig. 4 (a)~(d)는 과거 내습한 태풍 Maemi와 가상의 슈퍼태풍 (Vera, Durian, Katrina)에 의한 지역별 최대폭풍해일고를 나타내었으며, 또한 이 결과치를 Table 3에 수치로 나타내었다.

본 연구에서는 해석의 편의상 부산 연안역의 경우 No.1~No.14를 부산 서부 연안역, No.15~No.27을 부산 동부 연안역으로, 경남 연안역의 경우 No.1~No.16을 경남 서

부 연안역, No.17~No.32를 경남 동부 연안역으로 각각 구분하였다.

Fig. 4(a)의 부산 서부 연안역에서 No.1(가덕도 천성항), No.2(부산 신항 전면), No.3(녹산공단 전면), No.4(괴정천)의 경우, 태풍 Maemi보다 가상의 슈퍼태풍(Vera, Durian, Katrina)에서 높은 폭풍해일고가 나타났으며, 특히 Katrina의 경우에 있어서 No.4(괴정천)에서는 과거최대치를 나타낸 태풍 Maemi의 내습 시 1.89m보다 4.68m나 높은 6.57m의 폭풍해일고 수치를 나타내었다. 이러한 지역에서 특히 높은 폭풍해일고를 나타내는 것은 태풍의 특성(중심기압, 최대풍속반경, 이동속도 등)의 영향도 있지만 녹산공단전면

과 가덕도 사이의 협수로로 인하여 수괴의 진행이 차폐되고, 낙동강 하구지역과 같이 만의 길이가 길고 수심이 얕은 지역적 특성이 큰 영향을 미친것으로 판단된다(강 등, 2004; 이 등, 2004; 허 등, 2006a).

그러나 Fig. 4(b)에서와 같이 부산 동부 연안역에 가까워지면 서부 연안역에 비해 점차 낮은 폭풍해일고가 나타난다. 이는 부산 동부 연안역이 얕은 내만이나 차폐영역이 존재하지 않는 대체적으로 평활한 해안선으로 이루어져있기 때문이며, 동부 연안역에서는 지형적인 영향보다는 태풍의 특성(중심기압, 최대풍속반경, 이동속도 등)이 주요한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 4(c)의 경남 서부 연안역에서도 Katrina의 경우에

서 가장 높은 폭풍해일고를 나타내고 있으며, 또한 대부분의 지점에서 높은 폭풍해일고가 나타나지만, No.6의 진주만내와 No.7의 진주만 입구에서는 만이면서도 상대적으로 낮은 폭풍해일고를 나타낸다. 이러한 경향은 태풍의 특성과 상관없이 모든 경우에서 동일하게 나타나고 있다. 이는 Fig. 1(b)에서 알 수 있는 것과 같이 진주만 부근은 태풍 Maemi 진행경로의 서쪽에 위치함으로서 비교적 풍속이 약한 안전반원 내에 속해 있기 때문으로 판단된다.

Fig. 4(d)의 경남 동부 연안역 역시 태풍 Maemi보다 가상의 슈퍼태풍(Vera, Durian, Katrina) 내습 시에 높은 폭풍해일고가 나타난다. 특히 태풍 Maemi 내습 시 가장 큰 피해를 입었던 마산만 일대의 No.26(마산항 검조소)와

Table 3. Comparison of maximum storm surge height according to Typhoon at Busan coast(No.1~No.27) and Gyeongnam coast (No.1~No.32)

Point	Calculated site (No.1~No.27)	Maemi (m)	Vera (m)	Durian (m)	Katrina (m)	Calculated site (No.1~No.32)	Maemi (m)	Vera (m)	Durian (m)	Katrina (m)
No. 1	Gadeokdo Cheonseong harbor	1.35	2.09	1.95	4.87	Namhae Seo-myeon Seosang-ri	1.15	2.41	2.33	5.99
No. 2	Busan newport	1.58	2.44	2.23	5.70	Namhae Dugok, Wolpo	1.07	2.16	2.07	5.54
No. 3	Noksan industrial estate	1.64	2.66	2.43	6.42	Namhae Sangju	1.13	2.06	1.93	4.88
No. 4	Goejeong rivulet	1.89	2.77	2.44	6.57	Namhae Mijori	1.31	2.24	2.12	5.47
No. 5	Dadaepo(uper)	1.16	1.89	1.76	4.78	Namhae Mulgeonri	1.34	2.39	2.28	6.21
No. 6	Dadaepo(lower)	1.13	1.85	1.75	4.61	Jinju bay	0.74	1.67	1.59	2.81
No. 7	Songdo beach	1.09	1.80	1.69	4.55	Entrance of Jinju bay	1.00	1.83	1.68	3.40
No. 8	Yeongdo Namhang-dong	1.14	1.87	1.73	4.70	Samcheonpo port	1.37	2.65	2.55	7.55
No. 9	Busan tide station	1.08	1.84	1.71	4.51	Samcheonpo Namildae beach	1.37	2.62	2.51	7.40
No.10	Busan port	1.08	1.85	1.71	4.39	Samcheonpo breakwater	1.37	2.58	2.46	7.18
No.11	Gamman C/Y	0.97	1.61	1.51	3.78	Jaran bay	1.48	2.69	2.47	7.07
No.12	Samick beach town	0.87	1.40	1.40	3.36	Goseong bay	1.67	2.70	2.51	6.55
No.13	Gwangalli beach	0.92	1.49	1.46	3.57	Saryangdo	1.38	2.27	2.12	5.80
No.14	Gwangalli park	0.92	1.47	1.44	3.51	Yokjido	1.26	1.96	1.84	4.40
No.15	Millak waterside park	0.90	1.44	1.41	3.43	Tongyeong port	1.65	2.61	2.28	6.14
No.16	Hanhwa resort	0.89	1.42	1.38	3.36	Tongyeong Dongho harbor	1.63	2.58	2.25	6.06
No.17	Maritime tourist hotel	0.90	1.44	1.40	3.39	Between Mireukdo and Hansando	1.50	2.30	2.06	5.34
No.18	Dongbak island	0.87	1.38	1.35	3.23	Left side of Bijindo	1.30	1.95	1.82	4.51
No.19	Haeundae beach	0.88	1.40	1.36	3.30	Right side of Bijindo	1.32	2.08	1.86	4.80
No.20	Haeundae Mipo	0.88	1.38	1.35	3.25	Geojae Myeongsa beach	1.32	1.91	1.91	4.29
No.21	Songjeong beach	0.80	1.27	1.27	2.82	Geojae Hakdong beach	1.12	1.88	1.71	4.24
No.22	Daeyeon harbor	0.80	1.28	1.25	2.82	Geojae Wahyeon beach	1.22	2.02	1.78	4.60
No.23	Jukseong harbor	0.76	1.19	1.18	2.58	Jisepo harbor	1.09	1.83	1.73	4.19
No.24	Ilgwang beach	0.75	1.20	1.20	2.62	Okpo bay	0.99	1.63	1.63	3.79
No.25	Chliam harbor	0.81	1.28	1.24	2.86	Entrance of Danghangpo	1.71	2.79	2.62	6.19
No.26	Imnang beach	0.86	1.35	1.29	3.04	Masan tide station	1.84	3.26	3.08	7.77
No.27	Gori nuclear power site	0.78	1.20	1.17	2.56	Masan Wolyeong-dong	1.84	3.26	3.08	7.76
No.28	-	-	-	-	-	Masan Jeodo	1.83	3.20	3.02	7.56
No.29	-	-	-	-	-	Entrance of Masan port	1.71	2.77	2.58	6.22
No.30	-	-	-	-	-	Entrance of Haengam bay	1.68	2.69	2.50	6.02
No.31	-	-	-	-	-	Jinhae custom house	1.70	2.70	2.51	6.09
No.32	-	-	-	-	-	Haengam bay	1.72	2.75	2.55	6.18

No.27(마산 월영동) 및 No.28(마산 저도)에서 Katrina의 경우 폭풍해일고가 각각 7.77 m, 7.76 m, 7.56 m로서 부산·경남을 통틀어 가장 높은 값을 나타내고 있다. 이는 마산만 일대가 Maemi 진행경로의 바로 동쪽에 위치하여 강한 풍속의 영향을 받는 위험반원 내에 포함되어 있음과 동시에, 전술한 바와 같이, 폭풍해일고를 상승시키는 만의 지형적 특성(길이가 길고 만 내부로 갈수록 수심이 얕아 지는)을 마산만이 가지고 있기 때문으로 판단된다.

이상의 결과로부터, 과거 부산·경남 연안역에서 최대의 폭풍해일고를 기록한 태풍 Maemi보다 Vera와 Durian의 경우가 약 1.5배 정도 높은 폭풍해일고를 나타내었으며, Katrina의 경우에는 약 4배 이상의 폭풍해일고 수치를 나타내고 있다.

이와 같이, 가상의 슈퍼태풍이 태풍 Maemi와 유사한 진행경로를 통해서 우리나라 남해 동부 연안역에 내습해 온다면, 부산·경남 연안역에서는 사상 유례가 없는 막대한 피해를 입을 것으로 사료된다. 특히, 부산 서부 연안역의 가덕도 천성항, 녹산공단전면, 부산 신항, 괴정천 및 경남 연안역의 마산항, 마산 월영동, 마산 저도 등의 일부 특정지역에서는 엄청난 높이의 폭풍해일로 인하여 막대한 경제적 손실은 물론 엄청난 인명피해가 발생할 것으로 판단된다. 따라서 머지않은 미래에 발생할 것으로 예측되는 슈퍼태풍으로부터 우리의 생명과 재산을 지키기 위하여, 방재시설과 방재대책 및 태풍에 관한 인지도교육시스템의 마련 등은 시급을 다투는 중요한 문제이다.

4. 결 론

본 연구에서는 가까운 장래에 내습할 것으로 예측되는 슈퍼태풍에 대한 위험성을 인지하고 사전준비 및 방지책의 강구를 촉구하기 위하여, 부산·경남 연안역에 막대한 피해를 입힌 태풍 Maemi와 세계적으로 막대한 피해를 입힌 태풍(Katrina, Durian, Vera)을 조합하여 시뮬레이션을 수행한 후, 추정된 폭풍해일고를 비교·검토하였다.

수치시뮬레이션 결과로부터, 부산·경남 연안역 대부분의 지점에서 가상의 슈퍼태풍 내습 시 Durian과 Vera의 경우, Maemi 내습 시보다 약 1.5~2.0배 높은 폭풍해일고를 Katrina의 경우, 약 4.0배 이상의 높은 폭풍해일고를 나타내었다.

따라서 태풍 Maemi 내습 시의 피해가 어느 정도였는지를 감안한다면, 이상과 같은 최대폭풍해일고의 수치로

서 슈퍼태풍의 위험성을 충분히 인지할 수 있을 것으로 판단되며, 슈퍼태풍의 내습으로부터 우리의 생명과 재산을 지키기 위해서는, 하드적인 방재대책(방재시설의 구축 등)과 소프트적인 방재대책(방재·피난정보의 제공 및 피난 유도 등)의 적절한 결합 및 최적의 방재시스템을 구축하는 것이 폭풍해일 재해예방 및 최소화를 위하여 조속히 해결하여야 할 과제이다.

참고문헌

- 강윤구, 토미타, 김도삼, 안성모 (2004). 태풍 매미 내습 시 남동연안에서의 해일·파랑에 의한 침수재해 특성. 한반도 해역의 고파폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해양공학학회, 35-43.
- 이종섭, 한성대 (2004). 마산시의 해일방재대책 방향설정예 관한 고찰. 한반도 해역의 고파폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해양공학학회, 45-47.
- 필리핀 국가재난방재위원회 (2006). 태풍 두리안(Reming)의 피해. 2006년 12월 16일 오전 06시 보도자료, <http://ndcc.gov.ph/ndcc/>.
- 허동수, 염경선, 김지민, 김도삼, 배기성 (2006a). 부산연안에서 폭풍해일고의 추정. 한국해양공학회지, 20(3), 37-45.
- 허동수, 염경선, 김지민, 김도삼, 배기성 (2006b). 경남연안의 지역특성에 따른 폭풍해일고의 변동. 한국해양공학회지, 20(3), 45-53.
- JTWC(Joint Typhoon Warning Center). <http://metocph.nmci.navy.mil/jtwc.php/>.
- Mitsuyasu, H. and Kusaba, T. (1984). Drag Coefficient over Water Surface under the Action of Strong Wind. Journal of Natural Disaster Science, 6(2), 43-50.
- Myers, V.A. and Malkin, W. (1961). Some Properties of Hurricane Wind Fields as Deduced from Trajectories. U.S. Weather Bureau, National Hurricane Research Project, Report 49.
- 高橋重雄, 河合弘泰, 平石哲也, 小田勝也, 高山知司 (2006).ハリケーン・カトリーナの高潮災害の特徴とワーストケースシナリオ. 海岸工学論文集, 53, 411-415.
- 柴木秀之 (2004). 波浪・高潮・津波の数値計算と沿岸防災支援システムへの応用に關する研究. 東京大學博士學位論文.
- 宇多高明, 前原隆生, 牧野一正 (1994). 伊勢灣高潮の实用的予測モデル. 海岸工学論文集, 41, 261-265.

Received September 19, 2007

Accepted January 17, 2008