

경남연안의 지역특성에 따른 폭풍해일고의 변동

허동수* · 염경선** · 김지민*** · 김도심**** · 배기성*

*경상대학교 토목환경공학부 해양산업연구소

**경상대학교 대학원 토목환경공학부

***한국해양대학교 대학원 건설환경공학부

****한국해양대학교 건설환경공학부

Storm Surge Characteristics According to the Local Peculiarity in Gyeongnam Coast

DONG-SOO HUR*, GYEONG-SEON YEOM**, JI-MIN KIM***, DO-SAM KIM**** AND KI-SUNG BAE*

*Institute of Marine Industry, Division of Civil and Environmental Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

**Division of Civil and Environmental Engineering, Graduate School, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

***Division of Construction and Environmental Engineering, Graduate School, Korea Maritime University, Busan, Korea

****Division of Construction and Environmental Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

KEY WORDS: Typhoon Maemi 태풍 매미, Typhoon Sarah 태풍 사라, Typhoon Thelma 태풍 셀마, Numerical simulation 수치시뮬레이션, Storm surge height 폭풍해일고, Local peculiarity 지역특성

ABSTRACT: Each year, the south coast of Korea is badly damaged from storm surge. The damages are greatly dependent upon the local peculiarities of the region where the storm surge occurs. So, in order to prevent/reduce recurrence of the disaster, it is very important to investigate the fluctuation characteristics of the storm surge height, related to the local peculiarities at each coastal area where occurrence of the disaster is expected. In this paper, using the numerical model, the storm surge was simulated to examine its fluctuation characteristics at the Gyeongnam coast (southeast coast of Korea). Typhoons of Sarah (5914), Thelma (8705) and Maemi (0314), which caused terrible damage to the coastal area in the southeast coast of Korea in the past, were used for storm surge simulations. Moreover, the storm surge due to virtual typhoons, which were combined the characteristics of each proposed typhoons (Maemi, Sarah, Thelma) with the travel route of other typhoon, was predicted. As expected, the results revealed that the storm surge heights are enhanced at the coastal regions with the concavity like a long-shaped bay. Also, the storm surge heights, due to each typhoon, were compared and discussed at major points along the Gyeongnam coast, related to the local peculiarities, as well as the characteristics and the travel route of typhoon.

1. 서 론

우리나라 남해안 주변의 연안역 일대는 매년 태풍에 의한 막대한 피해를 입고 있다. 이러한 태풍들은 해를 거듭 할수록 태풍규모 및 재해규모 면에서 각종 기록을 경신하며 그 영향력이 커지고 있는 실정이다.

최근, 폭풍해일의 위험성에 대한 인식이 비교적 높아지고 있고, 폭풍해일에 관한 연구(강용균, 2004; 강윤구, 2005; 강윤구 등, 2004; 김경옥 등, 2004; 최병호, 2004; 최병호 등, 2004; Kawai et al., 2005a, b)도 조금씩 늘어가고 있는 실정이다. 그러나 지역특성에 따른 폭풍해일고의 예측은 아직까지 충분히 검토된 사례가 없으며, 이에 따른 전국 연안에 대해서 폭풍해일에 의한 위험성 검토는 조속히 해결해야 할 과제이다.

따라서, 본 연구에서는 폭풍해일의 피해에 가장 많이 노출되어 있는 남해 동부 연안 중 경남 연안역을 대상으로 폭풍해일

의 위험성 검토를 위한 수치시뮬레이션을 실시하였다. 우선, 2003년 9월 12일 경남 사천에 상륙(당시 중심기압 950hPa)하여 마산을 비롯한 경남 연안역에 막대한 피해를 입히며, 과거 태풍 중 태풍규모와 재해규모 측면에서 각종 기록을 경신한 태풍 매미를 대상으로 폭풍해일고를 산정하였다. 다음으로 태풍 매미 이전의 기록에서 경남을 포함한 우리나라 남해 동부 연안에 가장 큰 피해를 준 태풍으로 인식되고 있는 1959년 14호 태풍 사라(Sarah)와 1987년 5호 태풍 셀마(Thelma) 상륙시의 경남 연안역에서의 폭풍해일고를 재현하였다. 단, 재현계산시에는 현재의 해저지형을 이용하였다. 또한 내습 가능한 폭풍해일의 상세한 위험성 검토를 위하여 태풍 매미, 사라 및 셀마 상륙시의 이동 경로에 이들 각각의 태풍 특성(중심기압, 태풍의 이동속도 및 태풍반경)을 조합시킨 조건도 폭풍해일 시뮬레이션의 설정조건으로서 이용하였다. 이러한 폭풍해일의 계산결과를 근거로 과거 경남 연안역에 큰 영향을 주었던 태풍 및 앞으로 충분히 발생할 수 있는 가상의 태풍에 의한 폭풍해일고의 지역별 특성을 검토하였다.

교신저자 허동수: 경남 통영시 인평동 445번지

055-640-3152 dshur@nongae.gsnu.ac.kr

2. 폭풍해일 시뮬레이션

2.1 기초방정식

폭풍해일 시뮬레이션에 이용한 계산수법은, 저기압에 의한 수면상승과 바람에 의한 수면상승을 고려한 비선형장파이론에 근거한 단층모델을 이용하였다(Kawai et al., 2005a, b).

폭풍해일추산에 이용하는 해상풍(해면상 10m 고도에서의 바람)은, 2.4절에서 설명되는 Myers의 기압분포를 가정한 태풍모델에 의해 추산한 자유대기풍(기압경도풍과 태풍의 이동에 의한 바람장)에 해면마찰을 고려하여 이용하였다. 일반적으로 자유대기풍을 해상풍으로 변환시킬 때, 해면상의 풍속의 연직분포가 대수분포인 것을 감안하여 자유대기의 바람장에 0.6~0.7 정도의 풍속 저감율을 곱하여 사용하며, 경도풍의 풍향을 저압부를 향해 약 30의 각도로 편향시켜서 사용하며, 위·경도에 따라 그 값을 변화한다. 이와 같이 대상으로 하는 태풍(Sarah, Thelma, Maemi)의 풍속에 따라 풍속의 저감율과 편향각의 값을 다르게 적용하여야 하나, 본 연구에서는 계산의 편의상 풍속의 저감율을 0.67, 풍향의 편향각을 30로 일정하게 설정하였다.

본 연구에 이용된 기초방정식을 나타내면 다음과 같다. 먼저, 기본식은 연속식 식 (1)과 운동방정식 식 (2)~(4)로 구성된다.

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

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

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= -fu - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial y} \\ &+ A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{dw}{dt} = -g - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

여기서, x, y 는 수평방향좌표계, z 는 연직방향좌표계이다.

변수 u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 유속성분이다. f 는 Coriolis 계수, ρ_w 는 해수의 밀도, p 는 수압, A_h 와 A_v 는 수평 및 연직 와동점성계수, g 는 중력가속도이다.

n 는 폭풍해일에 의한 수면변위로써, 식 (1)을 해자 $z = -h$ 에서 해면 $z = n$ 까지 적분하면 다음 식 (5)와 같이 된다.

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

여기서, N, M 은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, D 는 기본수심과 폭풍해일에 의한 수면변위를 합한 전수심이다.

$$\left. \begin{aligned} M &= \int_{-h}^n u dz = U(h+n) = UD \\ N &= \int_{-h}^n v dz = V(h+n) = VD \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

식 (4)를 z 방향에 대해서 적분을 수행하면 다음의 식이 얻어진다.

$$p = \rho_w g(n - z) + p_0 \quad (7)$$

여기서, p_0 는 수면에서의 기압이다.

식 (7)을 식 (2), (3)에 대입하여 해자 $z = -h$ 에서 해면 $z = n$ 까지 적분하면 다음 식 (8), (9)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} &\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \\ &= fN - gD \frac{\partial n}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} \\ &+ \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\ &= -fM - gD \frac{\partial n}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial y} \\ &+ \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

τ_{sx} 와 τ_{sy} 는 해면에서의 x, y 방향 전단력으로 식 (10)과 식 (11)로 나타내어지며, p_a 는 대기의 밀도, C_D 는 해면저항계수(항력계수), W_x 와 W_y 는 해면상 10m에서의 풍속이다.

$$\tau_{sx} = p_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (10)$$

$$\tau_{sy} = p_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)에 포함되는 해면저항계수(항력계수)에 대해서는 아직까지 검토해야 할 요소가 많이 존재하여, 이러한 해면저항계수를 조절함에 의해 과거에 내습한 폭풍해일고를 고정도로 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.

$$C_D = \begin{cases} (1.290 - 0.024 W)/10^3 & (W < 8) \\ (0.581 + 0.063 W)/10^3 & (W \geq 8) \end{cases} \quad (12)$$

τ_{bx} 와 τ_{by} 는 해저면에서의 x, y 방향 전단 응력으로 식 (13)과 식 (14)로 나타내어지며, n 은 Manning의 조도계수이다.

$$\tau_{bx} = \frac{\rho u g n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (13)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho u g n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (14)$$

이상과 같이, 폭풍해일 시뮬레이션을 위해 연속식 (5)와 비선형장파방정식 (8), (9)를 이산화하여 유한차분법으로 계산을 수행하였다.

2.2 계산대상영역

폭풍해일 시뮬레이션의 대상영역은 Fig. 1(a)에 나타낸 것과 같이, 태풍의 주경로를 포함하기 위해 한국 및 일본과 태평양을 포함하는 광역으로 설정하였다. 관심영역에서의 계산정도를 높이기 위하여 계산영역을 제1영역에서 제6영역까지 Nesting하여 계산을 수행하였다.

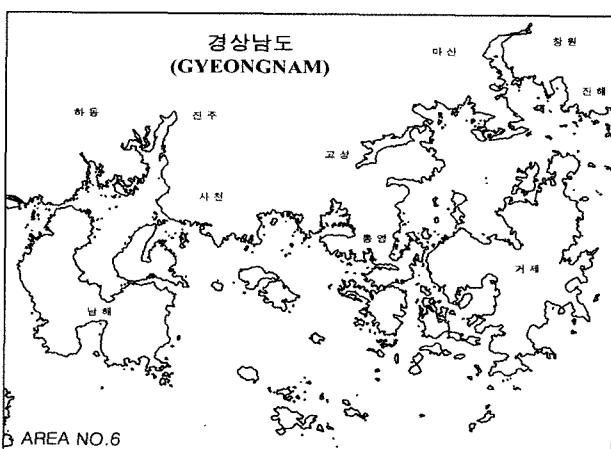
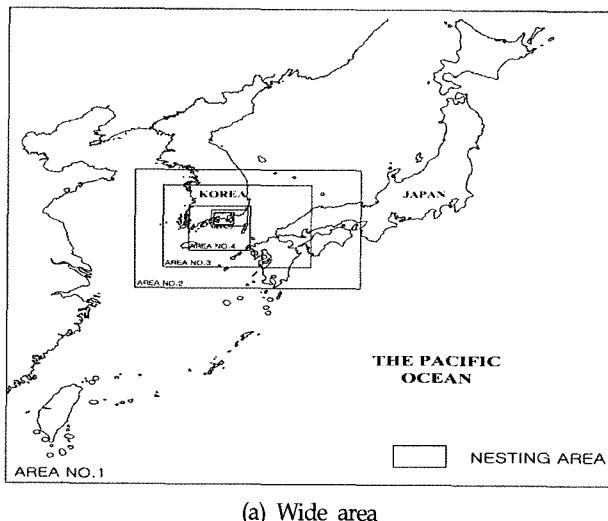


Fig. 1 Area of storm surge simulation

계산격자의 구성은 제1영역에서 32.4km의 격자크기로 시작하여, 순차적으로 16.2km, 5.4km, 1.8km, 600m의 격자간격을 이용하였으며 관심 대상영역인 제6영역 즉, Fig. 1(b)에 나타내는 경남 연안역에 있어서 최소격자간격은 200m로 설정하였다.

2.3 계산에 이용된 태풍경로 및 조건

Fig. 2에 과거 우리나라 남해 동부 연안에 영향을 주었던 태풍들의 이동경로를 나타내었다. 그림으로부터, 본 연구에서 폭풍해일 시뮬레이션의 조건으로 이용하는 태풍 사라(5914)와 태풍 셀마(8705) 및 태풍 매미(0314)는 남해 동부연안을 통과하는 대표적인 태풍진행경로라는 것을 알 수 있다.

1959년 14호 태풍 사라는 한반도로 직접 상륙하지 않고 부산 앞바다로 진행하였으나 태풍이 남해안에 상륙할 당시의 기압심도(대기압 1013hPa)과 태풍중심기압과의 기압차가 68hPa로써 태풍 매미(기압심도 63hPa)나 태풍 셀마(기압심도 43hPa)가 남해안에 상륙할 당시 보다 높은 기압심도를 나타내고 있다. 전라남도 고흥반도 인근으로 상륙하여 한반도 중앙을 관통한 태풍 셀마는 태풍 매미 이전 한반도에 내습한 태풍 가운데 재산피해로서는 최고를 기록하였다(이종섭 등, 1990). 또한, 과거 최대의 태풍으로 인식되고 있는 태풍 매미는 경남 사천 부근 해안으로 상륙하여 북북동진하여 경남 함안을 거쳐 경북 울진 해안을 통해 동해상으로 진출하였다.

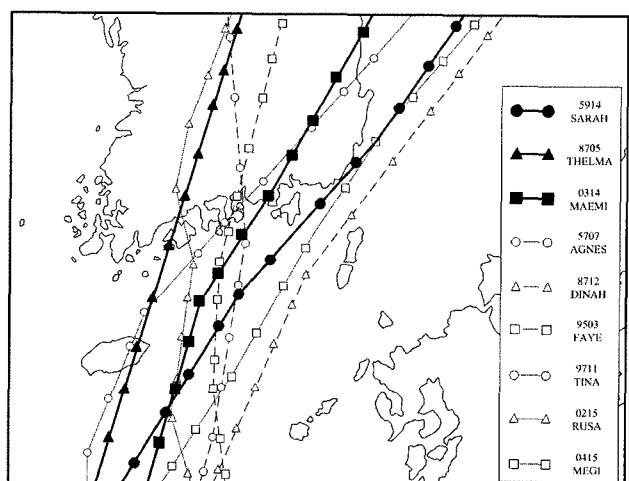


Fig. 2 Route of typhoons attacked around Gyeongnam coast in past years

Table 1 Typhoon conditions and routes used in storm surge simulation

Conditions	Routes	Case
Sarah	Sarah	Case-1
Thelma	Thelma	Case-2
Maemi	Maemi	Case-3
Sarah	Thelma	Case-4
Sarah	Maemi	Case-5
Maemi	Sarah	Case-6
Maemi	Thelma	Case-7

본 연구에서는 태풍 매미뿐만 아니라 경남 연안역에 인적·물적으로 가장 큰 영향을 주었다고 평가되는 태풍 사라 및 태풍 셀마에 의한 폭풍해일고의 수치시뮬레이션을 실시하였다. 또한, 이를 과거 태풍의 조합에 의한 4개의 가상 태풍에 대해서도 수치시뮬레이션을 수행하였으며, 계산에 이용된 태풍경로 및 조건의 조합을 Table 1에 나타내었다.

2.4 수치시뮬레이션의 타당성 검증

폭풍해일고의 위험성 검토를 위한 시뮬레이션을 실시함에 앞서, 우선 태풍 매미에 대한 수치 계산을 수행하여 본 연구에서 설정한 계산조건 및 수치 시뮬레이션 기법의 타당성을 검토하였다. 폭풍해일의 추산에 이용된 기압분포에는 식 (15)와 같은 Myers and Malkin(1961)의 분포를 가정하였고, 최대풍속 반경 r_0 는 남해안의 관측기압으로부터 구하였다.

$$p = p_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right). \quad (15)$$

여기서, p 는 태풍의 중심으로부터 거리 r 만큼 떨어진 점에서의 기압, p_c 는 태풍의 중심기압, Δp 는 기압심도, r_0 는 태풍의 반경이다.

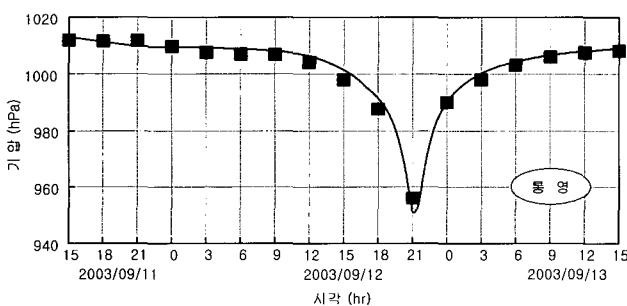
Fig. 3은 태풍 매미 통과시 통영 및 마산항 검조소에서 관측된 기압과 수치 시뮬레이션에 의한 기압의 시간변화 비교

를 나타내고 있다. 횡축과 종축은 각각 시간 및 기압 변화를 나타내고, 절은 사각형은 관측치를 실선은 계산치를 나타낸다. Fig. 3을 통해 계산치는 관측치를 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있다.

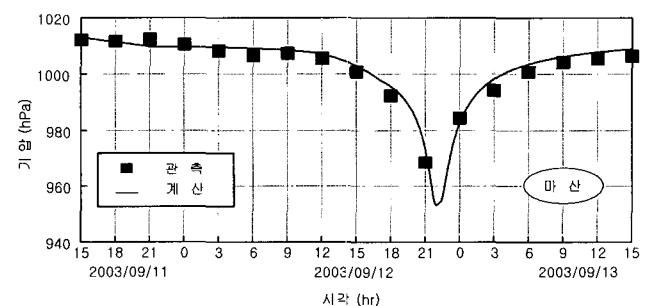
Fig. 4는 태풍 매미 내습시, 통영 및 마산항 검조소에서 관측된 폭풍해일고의 시간변화와 수치계산에 의해 계산된 폭풍해일고를 나타내고 있다. 횡축과 종축은 각각 시간 및 폭풍해일고의 변화를 나타내며, 점선은 관측치, 실선은 계산치를 표시한다. 우선 Fig. 4(b)를 보면, 태풍이 상륙하기 이전인 2003년 9월 12일 06시 전후에서, 관측치에 부의 조위편차가 발생하고 있는데, 이는 태풍 내습시의 일반적인 현상으로 판단하기에는 무리가 있으며, 이상 현상에 의한 것으로 판단된다. 이 부분에 대해서는 향후 추가적인 고찰이 필요하며, 본 연구에서는 생략하는 것으로 한다. 이러한 이상 관측치 부분을 제외하면, 폭풍해일고 피크치의 계산치는 전체적으로 관측치를 매우 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있다.

이상과 같은 결과로부터, 연안 형상에 따른 폭풍해일고의 위험성 검토를 위한 목적에 대해서 본 연구의 수치 모델은 충분한 정도를 가지고 있다고 판단된다.

향후 조석, 밀도 성층, Wavesetup 및 육상 지형의 영향 등을 고려할 경우 더욱 높은 정도의 폭풍해일고를 재현할 수 있을 것으로 판단된다.

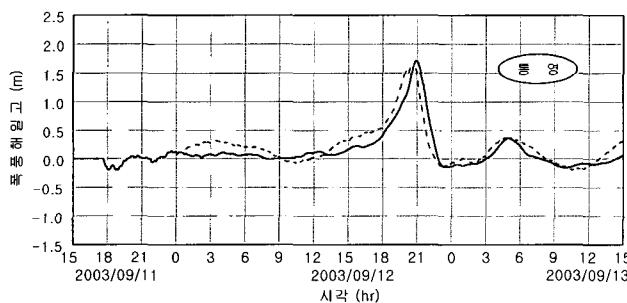


(a) Tongyeong tide station

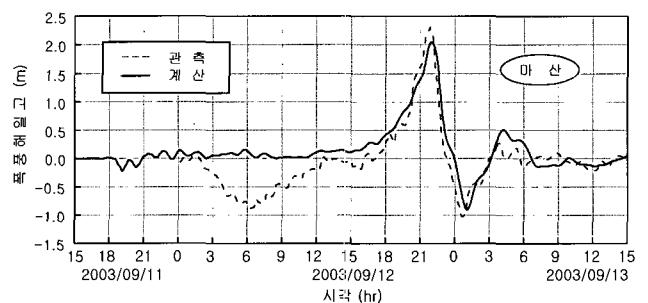


(b) Masan tide station

Fig. 3 Comparison between measured and calculated pressure time variations



(a) Tongyeong tide station



(b) Masan tide station

Fig. 4 Comparison between measured and calculated time variations of storm surge

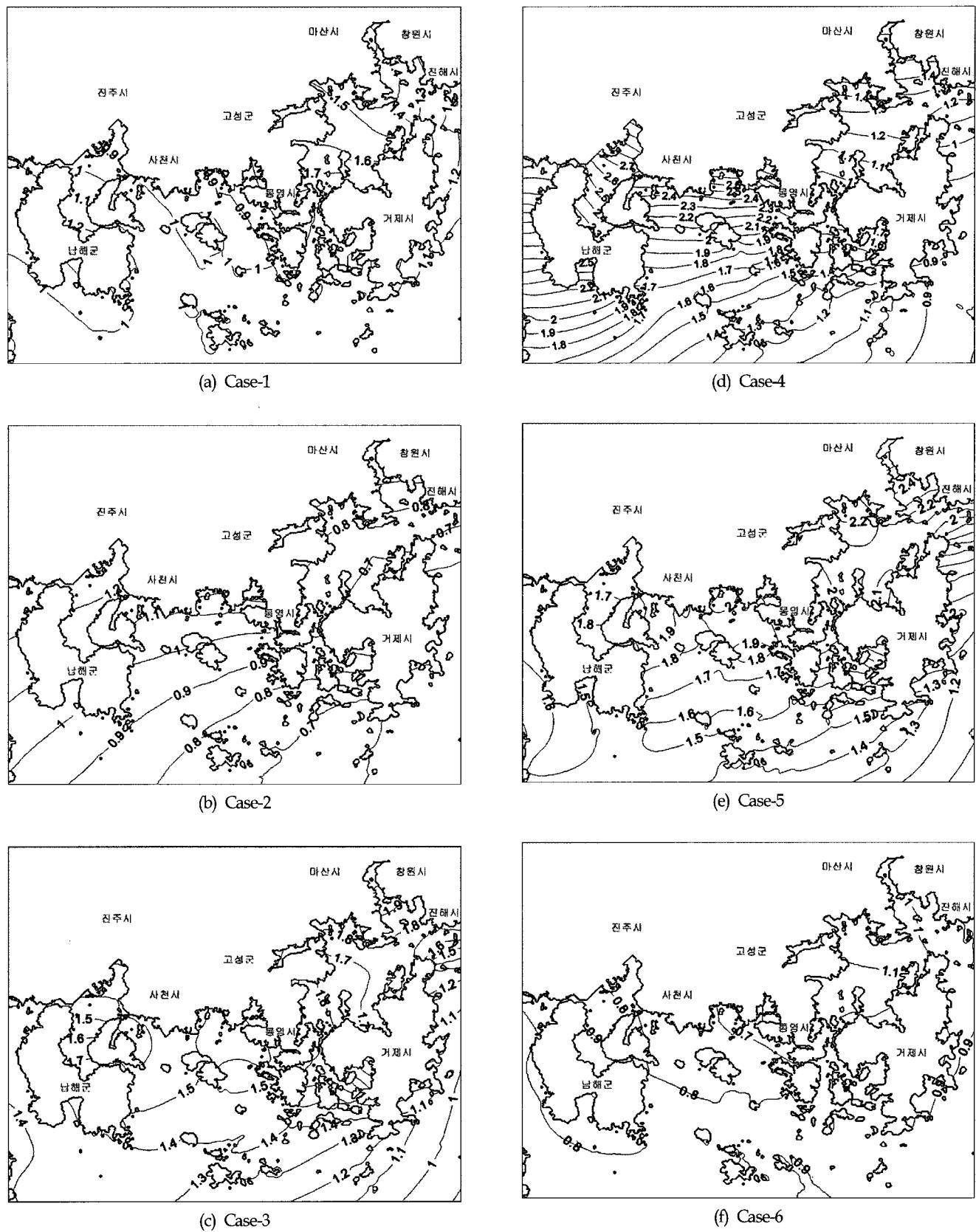
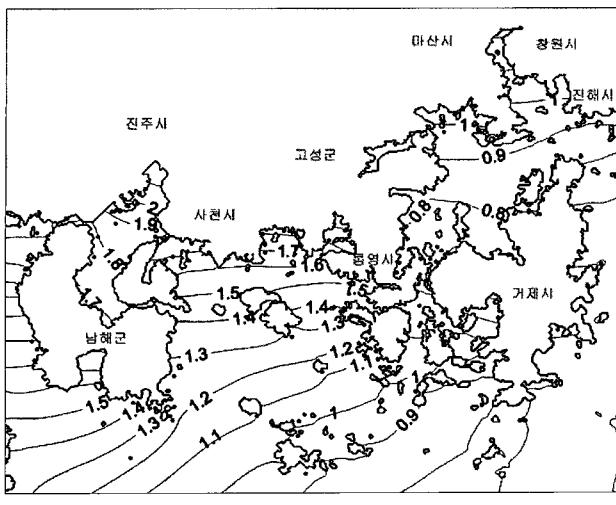


Fig. 5 Distribution of maximum storm surge



(g) Case-7

Fig. 5 Distribution of maximum storm surge(continued)

3. 결과 및 고찰

3.1 최대폭풍해일고 분포

Fig. 5는 Table 1에 나타내고 있는 각 조건들을 이용하여 추정된 최대폭풍해일고의 공간분포를 나타내고 있다. Fig. 5(a)의 태풍 사라(중심기압 945hPa)는 태풍 매미(중심기압 950hPa) 내습시보다 경남 연안 통과시의 중심기압이 낮음에도 불구하고 태풍 매미 내습시보다 낮은 조위편차(폭풍해일고)가 발생하고 있으며, 이는 태풍 사라가 경남 연안을 태풍의 안전(가항)반원에 두고 남해안을 통과하여 진행한데 비해, 태풍 매미는 경남 사천 지역으로 상륙하여 경남 연안 대부분의 지역이 태풍의 위험반원에 속해있었기 때문으로 판단된다. 또한, 태풍 사라의 최대폭풍해일의 등고선이 비스듬하게 연직 방향인 것 역시 태풍 진로의 영향이다.

Fig. 5(b)의 태풍 셀마(중심기압 970hPa)는 전라남도 고흥반도 지역으로 상륙한 관계로 남해안을 통해 이동한 태풍 사라(중심기압 945hPa)와 비슷한 조위편차를 나타내었고, 경남 지역으로 상륙한 태풍 매미(중심기압 950hPa)에 비해 낮은 조위편차를 나타내었다.

태풍 매미(Fig. 5(c))의 경우 경남 사천부근에 상륙하여 경남 내륙을 통해 진행해 감에 따라 경남 전역이 태풍의 위험 반원에 들었다. 이들 세 개의 태풍들(태풍 사라, 셀마, 매미) 중에서는 태풍 매미 내습시에 경남 연안역에 가장 높은 폭풍 해일고가 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

또한, Case-4의 경우(Fig. 5(d))에는 태풍 셀마(Fig. 5(b)) 내습시보다 20~150cm나 높은 조위편차가 발생했으며, Case-5의 경우(Fig. 5(e))에는 태풍 매미(Fig. 5(c)) 내습시보다 전체적으로 약 20cm 높은 조위편차가 발생했다. Fig. 5(f) Case-6의 경우는 오히려 실제 태풍 사라보다도 낮은 수치를 나타내었고, Fig. 5(g) Case-7의 경우에는 실제 태풍 셀마보다 10~70cm 높은 조위편차를 나타내었다. 이는 최대중심기압의 영향과 태풍

진행방향의 동쪽이 위험도가 높다는 것을 감안한다면, Fig. 2의 태풍 경로에서도 어느 정도 예측이 가능할 것이다.

이상의 결과로부터, 태풍의 이동 경로의 영향을 본다면 태풍 매미의 경우가, 중심기압의 영향을 고려한다면 태풍 사라 내습시의 경우가 경남 연안에 큰 조위편차를 나타낼 것을 알 수 있다. 또한 Case-4와 Case-5의 경우를 본다면, 경남 서부 연안에서는 태풍 셀마보다도 태풍 매미의 이동 경로에서, 경남 동부 연안에서는 태풍 셀마보다도 태풍 매미의 이동 경로에서 높은 폭풍해일고가 발생함을 알 수 있다. 이는 태풍의 진행방향과 다수의 섬을 가진 경남 연안지역의 복잡한 해안형상에 의한 결과라고 판단된다.

일반적으로 폭풍해일고는 외양에 면한 연안에서보다, 만의 형상 및 만 내부의 얕은 수심에 기인하여 만의 내부에서 더욱 높게 발생하는 것으로 알려져 있는데, 이러한 경향은 Fig. 5에서도 보여 진다. 거의 모든 태풍조건에 있어서 진주만, 고성만 및 마산만과 같은 만 내부에서의 조위편차가 외양에 면한 연안보다 높게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

3.2 최대폭풍해일고의 비교

경남 연안역의 지역형상에 따른 폭풍해일의 변동양상을 검토하기 위하여, Fig. 6에 나타낸 것과 같은 32개 지점에서의 폭풍해일고의 시간파형을 계산한 후, 이를 이용하여 최대폭풍해일고를 산출하였다. Fig. 7에 과거 내습한 태풍(매미, 사라, 셀마)과 이를 태풍들의 조합에 의한 4개의 가상 태풍에 대한 수치시뮬레이션의 결과치, 즉 각 지점에서의 각각의 조건에 대한 최대폭풍해일고를 동시에 나타내었으며, Table. 2에는 이러한 결과치를 수치로 나타내었다. 본 연구에서는 해석의 편의상 No.1~No. 16을 경남 서부연안, No.17~No.32를 경남 동부연안으로 구분하였다.

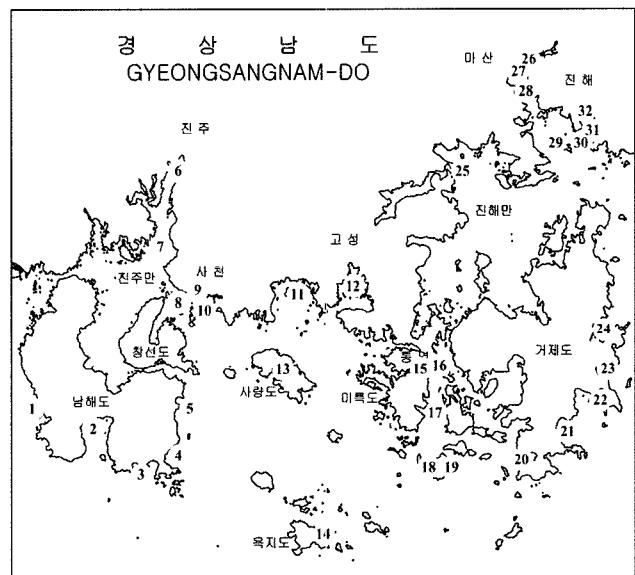


Fig. 6 Data extraction point around Gyeongnam coast

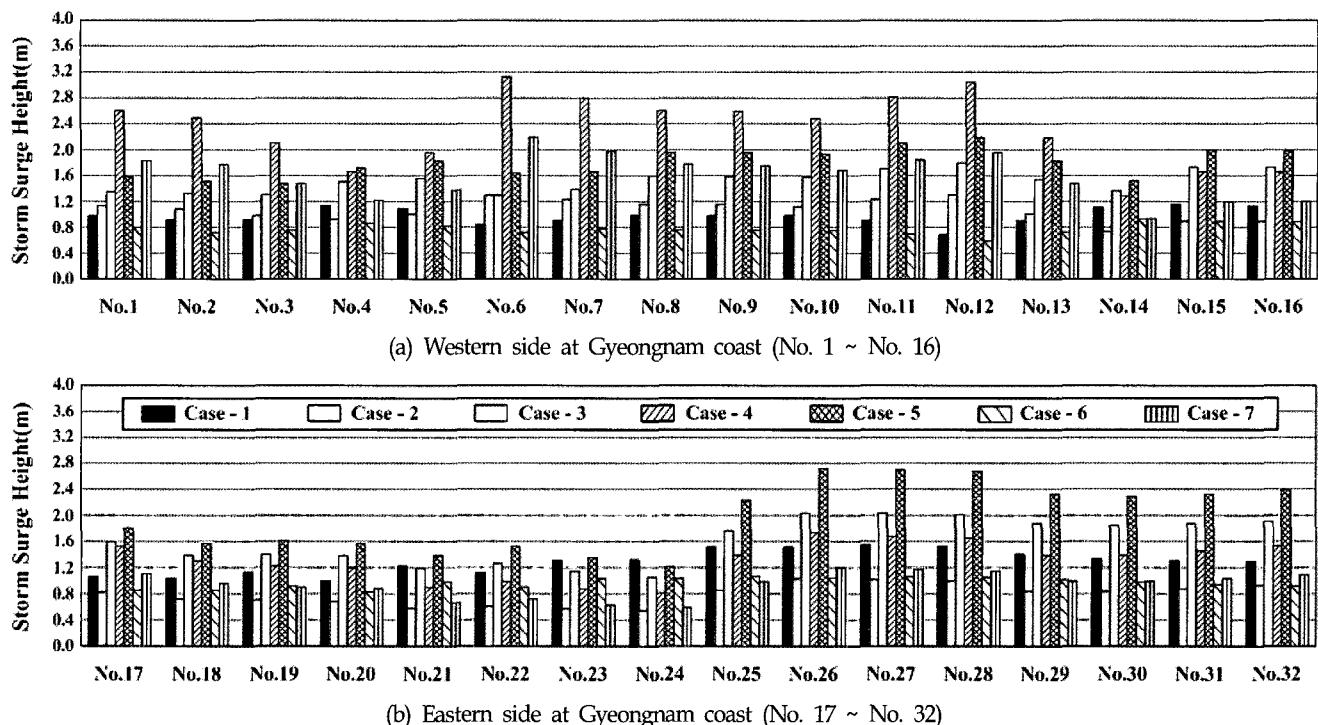


Fig. 7 Comparison of maximum storm surge according to difference of typhoon conditions

Table 2 Comparison of maximum storm surge according to difference of typhoon conditions

Point	Calculated site	Case-1 (m)	Case-2 (m)	Case-3 (m)	Case-4 (m)	Case-5 (m)	Case-6 (m)	Case-7 (m)
No-1	Namhae Seo-myeon Seosang-ri	0.97	1.13	1.35	2.60	1.57	0.79	1.83
No-2	Namhae Dugok, Wolpo	0.91	1.08	1.32	2.49	1.52	0.72	1.77
No-3	Namhae Sangju	0.92	0.98	1.30	2.10	1.47	0.75	1.47
No-4	Namhae Mijo	1.13	0.92	1.50	1.66	1.71	0.86	1.22
No-5	Namhae Mulgeon	1.09	1.00	1.55	1.95	1.82	0.81	1.37
No-6	Jinju bay	0.83	1.29	1.29	3.12	1.63	0.72	2.19
No-7	Entrance of Jinju bay	0.90	1.23	1.39	2.80	1.66	0.77	1.97
No-8	Samcheonpo port	0.98	1.16	1.59	2.60	1.96	0.76	1.77
No-9	Samcheonpo Namildae beach	0.97	1.15	1.58	2.59	1.95	0.75	1.75
No-10	Samcheonpo breakwater	0.98	1.12	1.57	2.48	1.93	0.75	1.68
No-11	Jaran bay	0.90	1.23	1.70	2.82	2.10	0.69	1.84
No-12	Goseong bay	0.68	1.30	1.79	3.04	2.19	0.58	1.95
No-13	Saryangdo	0.90	1.01	1.54	2.18	1.82	0.72	1.47
No-14	Yokjido	1.11	0.73	1.36	1.28	1.52	0.92	0.93
No-15	Tongyeong port	1.15	0.89	1.73	1.66	1.99	0.89	1.20
No-16	Tongyeong Dongho harbor	1.13	0.89	1.72	1.65	1.97	0.88	1.20
No-17	Between Mireukdo and Hansando	1.06	0.82	1.59	1.52	1.80	0.85	1.10
No-18	Left side of Bijindo	1.03	0.72	1.39	1.30	1.56	0.85	0.95
No-19	Right side of Bijindo	1.13	0.71	1.40	1.22	1.61	0.92	0.90
No-20	Geojae Myeongsa beach	0.99	0.68	1.38	1.20	1.56	0.83	0.88
No-21	Geojae Hakdong beach	1.22	0.58	1.18	0.90	1.39	0.98	0.67
No-22	Geojae Wahyeon beach	1.12	0.61	1.26	0.98	1.52	0.90	0.72
No-23	Jisaepo harbor	1.31	0.57	1.14	0.87	1.35	1.03	0.63
No-24	Okpo bay	1.32	0.54	1.05	0.81	1.21	1.03	0.59
No-25	Entrance of Danghangpo	1.51	0.85	1.76	1.39	2.23	1.07	0.98
No-26	Masan tide station	1.51	1.03	2.03	1.73	2.72	1.04	1.20
No-27	Masan Wolyeong-dong	1.54	1.01	2.03	1.68	2.71	1.06	1.17
No-28	Masan Jeodo	1.52	0.99	2.01	1.65	2.68	1.05	1.15
No-29	Entrance of Masan port	1.40	0.84	1.87	1.39	2.33	1.01	0.99
No-30	Entrance of Haengam bay	1.33	0.84	1.84	1.39	2.29	0.97	0.99
No-31	Jinhae custom house	1.30	0.87	1.87	1.45	2.32	0.94	1.03
No-32	Haengam bay	1.29	0.93	1.90	1.53	2.39	0.92	1.09

경남 서부 연안 지역에 속한 Fig. 7(a)의 대부분의 지역에서는, 과거의 태풍 조건(사라, 셀마, 매미) 중에서는 Case-3(태풍 매미)에서 높은 폭풍해일고를 보인 반면, 과거 태풍을 조합시킨 상황에서는 Case-4에서 뚜렷이 높은 폭풍해일고가 나타남을 알 수 있다.

Fig. 7(b)의 경남 동부 연안 역시 과거 태풍 중에서는 Case-3(태풍 매미)이 높은 폭풍해일고를 기록하고 있다. 하지만 과거 태풍을 조합해 본 결과, 태풍 매미(950hPa)보다 중심 기압이 낮은 태풍 사라(945hPa)를 태풍 매미의 이동 경로로 진행시킨 경우(Case-5)에서 가장 높은 폭풍해일고를 기록했다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이, 진주만(No.-6), 고성만(No.-12) 및 마산만(No.-26) 같은 내만지역에서 높은 폭풍해일고를 기록한 것은 태풍의 특성(중심기압, 이동속도, 태풍반경)과 이동 경로의 영향도 있겠지만, 만 사이에서 수괴의 진행이 차폐되거나, 만의 길이가 길고 수심이 얕은 곳에서 수위가 상승하는 폭풍 해일고의 특성 때문이라 판단된다(강윤구 등, 2004; 이종섭 등, 2004).

이와 같이 태풍의 특성(중심기압, 이동속도, 태풍반경)과 이동경로에 따라서 폭풍해일고에 큰 차이가 발생할 수 있다는 것을 알 수 있으며, 연안의 수심 및 평면적인 형상 등이 폭풍 해일고와 밀접한 관계가 있다는 것이 여기서도 확인되었다. 따라서, 수심이 얕고 길이가 긴 만의 내부연안과 같이 폭풍해일에 대한 위험성에 크게 노출되어 있는 지역은 특별한 주위와 대책이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 현재까지 우리나라에 가장 큰 피해를 주었던 태풍 매미(0314)와 태풍 매미 이전 경남 연안역에 인적·물적으로 가장 큰 영향을 주었다고 평가되는 태풍 사라(5914)와 태풍 셀마(8705)를 대상으로 경남 연안의 폭풍해일고를 추정하였고, 또한 과거 태풍의 조합에 의한 4개의 가상 태풍에 대해서도 시뮬레이션을 수행하였다.

또한, 검증을 위하여 태풍 매미 통과시 통영 및 마산항 검조소에서 관측된 기압 및 폭풍해일고의 시간변화와 본 연구에 의한 결과치를 비교·분석한 결과 전체적으로 좋은 일치성을 보이는 것을 확인하였다. 본 연구에서 얻어진 주요한 결론을 나타내면 다음과 같다.

(1) 과거 내습한 태풍(사라, 셀마, 매미) 중, 태풍 매미가 내습한 경우에 경남 서부 및 동부 연안에서 높은 폭풍해일고를 기록하였다.

(2) 태풍 매미 내습시의 이동 경로와 태풍 사라 내습시의 태풍특성을 조합한 조건에서 전반적으로 경남 연안의 최대폭풍 해일고 분포가 높게 나타났다.

(3) 경남 서부 연안에서는 태풍 셀마의 이동경로에서, 경남 동부연안에서는 태풍 매미의 이동 경로에서 폭풍해일고가 높게 나타났다.

(4) 과거 태풍을 조합시킨 상황에서는, 경남 서부 연안에 있

어서는 태풍 사라를 태풍 셀마의 이동 경로로 진행시킨 경우에서, 경남 동부 연안에 있어서는 태풍 사라를 태풍 매미의 이동 경로로 진행시킨 경우에서 가장 높은 폭풍해일고를 보였다.

(5) 진주만, 고성만 및 마산만과 같이 수괴의 진행이 차폐되거나, 만의 길이가 길고 수심이 얕은 곳에서 폭풍해일고가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

이상과 같이, 태풍의 이동 경로와 태풍의 특성(중심기압, 이동속도, 태풍반경)에 따라서 각 지역의 폭풍해일고에 차가 발생하는 것을 알 수 있었으며, 연안의 수심 및 평면적인 형상 등이 폭풍해일고와 밀접한 관계가 있으므로 수심이 얕고 길이가 긴 만의 내부연안과 같이 폭풍해일에 대한 위험성에 크게 노출되어 있는 지역은 특별한 주위와 대책이 필요할 것으로 판단된다.

또한 더욱 다양한 이동 경로 및 조건을 통한 데이터 베이스의 구축은 앞으로의 연구 과제이다. 그리고 보다 정도 높은 폭풍해일의 추산을 위하여, 조석, 밀도성층, 하천유입, Wave-setup 등의 고려 뿐만 아니라 해상풍의 추산에 육상지형의 영향을 고려할 수 있는 모델(3D-MASCON MODEL, 3D-SOLA)의 이용 등은 향후 해결해 나가야 할 과제이다.

후 기

본 연구를 수행하기 위해 많은 도움을 주신 일본 항만·공항 기술 연구소 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강용균 (2004). "태풍 '매미' 통과시의 해일공명", 한반도 해역의 고파·폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안·해양공학회, pp 57-62.
- 강윤구 (2005). "태풍 매미 내습시 해일·고파랑에 의한 호안·안벽에서의 수위증가 패턴 고찰", 한국해양공학회지, 제19권, 제6호, pp 22-28.
- 강윤구, 토미타, 김도삼, 안성모 (2004). "태풍 매미내습시 남동연안에서의 해일·파랑에 의한 침수재해 특성", 한반도 해역의 고파·폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안·해양공학회, pp 35-43.
- 김경옥, 야마시타 (2004). "해파-해일 복합현상에 의한 해일고산정, 한반도 해역의 고파·폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안·해양공학회, pp 81-86.
- 이종섭, 주귀홍, 장선태 (1990). "부산 연안 폭풍해일의 변동양상과 수치예측", 한국해안·해양공학회 논문집, 제2권, 제2호, pp 104-111.
- 이종섭, 한성대 (2004). "마산시의 해일방재대책 방향설정에 관한 고찰", 한반도 해역의 고파·폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안·해양공학회, pp 45-47.
- 최병호 (2004). "태풍 매미호에 의한 해안 재해", 한반도 해역

- 의 고파·폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안·해양공학회, pp 1-34.
- 최병호, 엄현민, 김현승, 정원무, 심재설 (2004). "Wave-Tide-Surge Coupled Simulation for Typhoon Maemi", 한반도 해역의 고파·폭풍해일 워크숍 논문집, 한국해안·해양공학회, pp 121-144.
- Kawai, H., Kim, D.S., Kang, Y.K., Tomita, T. and Hiraishi, T. (2005a). "Hindcasting of Storm Surge at Southeast Coast by Typhoon Maemi", 한국해양공학회지, 제19권, 제2호, pp 12-18.
- Kawai, H., Kim, D.S., Kang, Y.K., Tomita, T. and Hiraishi, T. (2005b). Hindcasting of Storm Surges in Korea by Typhoon 0314(Maemi)", Proceeding of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, pp 446-453.
- Mitsuyasu, H. and Kusaba, T. (1984). "Drag Coefficient over Water Surface under the Action of Strong Wind, Journal of Natural Disaster Science, Vol 6, No 2, pp 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.

2006년 3월 8일 원고 접수

2006년 6월 7일 최종 수정본 채택