

마산만에서 고조로 인한 침수원인 분석

황호동* · 이종우** · 권소현***

*한국해양대학교 대학원

**한국해양대학교 토목환경공학부 교수

***부산항만공사

Analysis of Flood due to Storm Surge at Masan Bay

Ho-Dong Whang* · Joong-Woo Lee** · So-Hyun Kwon***

*Graduate school of Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**Division of Civil and Environmental System Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

***Busan Port Authority

요약 : 개방해역에서의 폭풍고조의 계산은 특히 해안역의 계획 및 건설 작업 분야에서 의미있는 것이다. 본 연구에서 태풍으로 인한 수위의 변화예측은 물리모델에서나 실제현장에서 다루기가 매우 어렵기 때문에 수치모델에 주로 근거를 두었다. 폭풍고조에 대한 단순준이차원 수치모델을 다루었다. 모델배경에서 여러 가지 가정, 유효범위, 적용성을 이해하기 위하여 태풍과 폭풍의 발생과정을 좌우하는 물리적 인자들에 대하여 논하였다. 또한 수학적 관점 뿐만아니라 물리적인 관점에서 모델의 주요특성을 나타내기 위해 모델의 수립과정에 일반적으로 취한 가정과 함께 지배방정식을 따랐다. 본 논문에서 기술한 모델과 일치하는 방정식은 지배방정식을 축약시킨 것으로 이에 따른 수치기법을 제시하였다. 최종적으로 한국 남해안의 마산항에서 폭풍고조의 문제에 위에서 기술한 모델을 적용하여 천문조, 초기수면, 대기압에 따른 수위상승의 효과를 고려하였다. 아울러 해안도시지역에서의 침수원인을 분석하고, 침수방지를 위한 합리적인 제안을 제시하였다.

핵심용어 : 태풍고조위, 물리모델, 천문조, 초기수면, 대기압, 합성가상폭풍

ABSTRACT: Open-coast storm surge computations are of value in planning and constructing engineering works, especially in coastal regions. Prediction of typhoon surge elevations is based primarily on the use of a numerical model in this study, since it is difficult to study these events in real time or with use of physical models. A simple quasi-two dimensional numerical model for storm surge is considered. In order to understand the model's underlying assumptions, range of validity, and application, we discussed several aspects of typhoons and the physical factors governing storm generation processes. We also followed the basic governing equations, together with the assumptions generally taken in their development, to see the principle characteristics of the model from a physical as well as a mathematical point of view. The equations consistent with the model described here are reduced forms of the basic equations and their effects on the resulting numerical scheme are discussed. Finally we applied the model discussed above to a storm surge problem at Masan Bay, the south coast of Korea. Effects of astronomical tide, initial water level, and atmospheric pressure setup are considered. We then analyzed the flood at the coastal city and proposed a reasonable way of flood control.

KEY WORDS : Typhoon surge elevation, Physical model, Astronomical tide, Initial water level, Atmospheric pressure, Synthetic storm.

1. 서론

태풍의 발생과 그 영향으로 인한 해면의 변화예측은 항만 건설 및 해안지역을 개발하고 재해에 대비하는 데에 필연적이라 할 수 있다. 해안에서 고조의 예측은 간단하게 준이차원 수치해석방법으로 행할 수 있다. 이 방법은 지구 자전에 의한 연

안류효과를 고려하여 대륙붕의 가장자리에서부터 바람응력을 정상상태에 이르도록 적분하는 것이다. 전향력의 효과(Coriolis effect)를 고려한 해역회전근사는 적분과정이 일차원 문제와 유사한 방법으로 수행될 수 있다는 점에서 단순하다. Bretschneider & Collins(1963)는 Freeman et al.(1957)이 개발한 이론을 Texas의 Corpus Christi 및 그 부근에서 개방해안의 고조를 예측하는데 이용하였다. 여기서 기술하는 수치모델은 전술한 여러 학자에 의해 사용된 것보다는 다소 다

* sohyun6010@hanmail.net

051)999-3210

** jwlee@hanara.hhu.ac.kr

051)410-4461

*** hodongvov@hanmail.net

051)410-4981

른 Bodine(1971)의 해역회전근사이론으로부터 수립된 것이다. 이 방법을 적용하기 위하여 선택한 해안은 마산만으로 남해안에 위치하여 태풍의 직접적인 영향권에 쉽게 노출되어 있으므로 이로 인한 고조를 수치해석으로 계산하는데 적합한 해역으로 사료된다. 본 연구에서는 해안역에서 침수원인의 분석을 위해 최근 100년 빈도의 태풍이라고 하는 태풍 매미를 선정하여 이것이 지닌 태풍파라미터를 이용하기로 한다.

2. 이론적 배경

본 연구서 다루는 폭풍조이론은 대륙붕에 대해 단일횡단선을 따라 해수면의 변화를 평가하기 위한 준 2차원적 방법이다. 다른 1차원적 방법과는 달리 지구자전의 영향을 다소 고려하고 있다. 그러나 이 이론은 완전한 폭풍생성과정에서 단지 근사화한 것으로 실제 폭풍의 예측에는 고려하는 상황에 따라 다르다. 이 방법의 유용성을 알기 위해서는 이 이론이 포함하고 있는 근본적인 가정과 개발단계에서 무시한 수력학적인 과정을 이해할 필요가 있다. 또한 근사화의 배경으로 문제에 부과된 초기조건과 적절한 기본 수력학적인 관계를 나타내어야 한다.

2.1 부과조건

폭풍고조를 발생시키는 지배방정식을 유도하기 위해 부과한 조건을 기술하기로 한다. 이로부터 최후의 방정식을 쉽게 이해할 수 있을 것이다. 이들 조건은

1) 단주기 파랑은 제외하여 수평방향의 단위를 $L \gg D$ 및 $L \ll RE$ 로 제약한다. 이때 D는 수심, L은 파장, RE는 지구의 반경을 나타내는데 이는 다음을 의미한다.

① 속도 및 가속도의 수직성분은 무시한다. 따라서 수직방향 압력변화성분은 정수압적이고 코리올리력의 수직성분은 무시할 수 있다.

② 지구의 곡률은 무시할 수 있다.

2) 지구 자전으로 인한 가속은 일정하다.

3) 유체는 균질하며 비압축적이므로 물의 밀도는 일정하다.

4) 유체는 비점성이므로 점성에 의한 내부력은 무시한다.

5) 해저면은 고정, 불투과성으로 간주한다.

6) 표면과의 영향은 폭풍고조에 선행적으로 중첩시킬 수 있는 것으로 간주한다.

따라서 수평운동만 일어나는 것으로 간주하고 이와 같은 유체운동을 다룰 때는 전통적인 접근방법을 사용한다. 장파의 진행에 동반된 물의 운동은 비정상적이고 상태가 끊임없이 변한다. 그러나 이변화는 급격하지 않으며 점진적으로 변하는 것으로 간주할 수 있다.

2.2 적용 방정식

본 연구에서도 폭풍고조에 적합한 기초 방정식으로 체적수송

의 방법을 사용하는 것으로 한다. 이 형식은 총 수심에 대해 수직으로 지배방정식을 적분하여 구한다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 좌표계를 나타낸다. 여기서 D는 시간 t에서 총 수심을 나타내며 이는 평균 해면에서의 수심 d에 자유 해면의 변화 S를 더한 것이다. 좌표계 x,y는 평균 해면에 놓인 평면 좌표계이고, z는 상방향의 수직좌표계이다. 또한 x와 y는 반시계 방향으로 취하였으며 x 방향은 해안선에 대해 수직 방향으로 해안선을 향하도록 하였다. 이차원 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{M_{xx}}{\partial x} + \frac{M_{yy}}{\partial y} = fV - gD \frac{\partial S}{\partial x} + gD \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\tau_{xy} - \tau_{yx}}{\rho} - W_x P \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} = -fU - gD \frac{\partial S}{\partial y} + gD \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\tau_{yx} - \tau_{xy}}{\rho} - W_y P \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = P \quad (3)$$

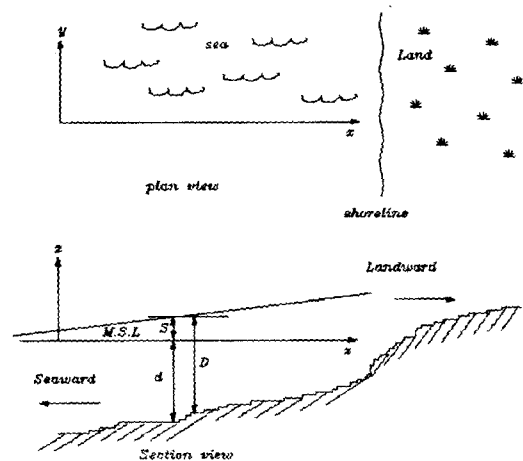


Fig. 1. Schematic diagram of the coordinate system

식 (1)과 (2)는 운동량 보존을 나타내고 보통 운동방정식이라 한다. 이 방정식은 (질량×가속도)로 나타내는 Newton의 법칙에 근거를 두고 있다. 식 (3)은 비압축성유체에 대한 질량 보존을 나타내며 일반적으로 연속 방정식이라 한다. 여기서 사용된 기호는 다음과 같다.

U, V = 단위폭당 체적 수송의 x, y 성분

$$U = \int_{-d}^S u \, dz, \quad V = \int_{-d}^S v \, dz$$

t = 시간

M_{xx}, M_{yy}, M_{xy} = 운동량 수송량

$$M_{xx} = \int_{-d}^S u^2 dz, \quad M_{yy} = \int_{-d}^S v^2 dz, \quad M_{xy} = \int_{-d}^S uv dz$$

s = 시간 및 공간에 따른 해면의 변화
(평균해면으로 부터의 거리)

d = 수심

D = 전수심 ($s+d$)

$f = 2\omega \sin \phi$, 코리올리계수

$\omega = 2\pi/24$, 지구의 각속도

ϕ = 위도

τ_{sx}, τ_{bx} = x 방향 해면 및 해저면 응력

τ_{sy}, τ_{by} = y 방향 해면 및 해저면 응력

ρ = 해수 밀도

W_x, W_y = x, y 방향 풍속

ξ = 해면기압감소

u, v = x, y 방향 유속

P = 강수량(깊이/시간)

g = 중력가속도

2.3 수식의 근사화

해역회전 폭풍조이론을 개발할 당시 Freeman et al.(1957)이 도입한 가정은 다음과 같다.

- 1) 해안선에 수직으로의 체적 수송은 무시할 수 있다.

$$\frac{\partial U}{\partial t}, fU, \frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\tau_{bx}}{\rho} \rightarrow 0$$

- 2) 해안측 방향의 바람은 순간적인 해면의 상승을 동반한다.
- 3) 이류운동량(장가속항)은 무시한다.

$$M_{xx}, M_{yy}, M_{xy} \rightarrow 0$$

- 4) 해안을 따라 해면은 일양하게 분포한다.

$$\frac{\partial S}{\partial y}, \frac{\partial V}{\partial y} \rightarrow 0$$

- 5) 등심선은 나란하다.

- 6) 강수량은 무시할 수 있다. $P \rightarrow 0$

이와 같은 과정을 기초로 하여 식 (1) 및 (2)의 운동방정식은 다음과 같이 줄일 수 있다.

$$gD \frac{\partial S}{\partial x} = fV + \frac{\tau_{sx}}{\rho} \quad (4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho} \quad (5)$$

또한 식 (3)의 연속 방정식은 해역회전 근사의 가정으로부터 무시할 수 있다. 따라서 식 (4), (5)는 계산이 x축에 대해서만 이루어지기 때문에 준 이차원적이라고 하며 y축을 따라 수송변화율은 지구자전의 효과 때문에 여전히 유지하게 된다.

해저와의 응력관계를 수송식으로 나타내면

$$\frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{KV|V|}{D^2} \quad (6)$$

V 는 유속의 y 방향 성분을, K 는 무차원 해저마찰계수이고, Chezy계수 C 와 Darcy-Weisbach 마찰인수 f_f 를 사용하여 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$K = \frac{g}{C^2} = \frac{f_f}{2} \quad (7)$$

표준 해저면에 대해서 K 는 보통 $2 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3}$ 의 범위인 것으로 알려졌다. 바람으로 인한 해면 응력은 다음과 같다.

$$\tau_s = \rho k W^2 = \rho k |W| |W| \quad (8)$$

여기서 k 는 무차원 해면마찰계수를, W 는 풍속을 나타낸다. 표준관측치를 사용하기 위해서는 해면으로부터 10m 높이에서, 10분간의 평균풍속을 취한다.

식 (4)와 (5)에 사용하기 위한 식 (8)의 해면응력을 최종적으로 정리하면 식 (9)와 같다. 이때 θ 는 x축과 풍향이 이루는 각을 나타낸다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau_{sx}}{\rho} &= kW^2 \cos \theta \\ \frac{\tau_{sy}}{\rho} &= kW^2 \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

유도한 해면응력을 식 (4)와 (5)에 대입하여 정리하면

$$\frac{\partial S}{\partial x} = \frac{1}{gD} [fV + kW^2 \cos \theta] \quad (10)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = kW^2 \sin \theta - \frac{kV^2}{D^2} \quad (11)$$

이와 같이 두개의 단순화된 미분방정식은 수치적분법으로 쉽게 해를 구할 수 있다. 그러나 이는 폭풍고조에 대한 기본방정식 (1),(2),(3)을 단순화하였기 때문에 이의 적용은 특정문제에만 국한된다.

때로는 평균해면의 상승 중 해안에 직각방향분과 연안방향분이 차지하는 정도에 관심을 갖게 되는데 상승치의 연안방향에 미치는 영향은 식 (10)을 다음 식 (12) 및 (13)의 형태로 분리하여 생각한다.

$$\frac{\partial S_x}{\partial x} = \frac{kW^2 \cos \theta}{gD} \quad (12)$$

$$\frac{\partial S_y}{\partial x} = \frac{fV}{gD} \quad (13)$$

따라서 x 축을 따라 총 평균해면상승은 이 둘을 합한 식 (14)가 된다.

$$\frac{\partial S}{\partial x} = \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial x} \quad (14)$$

3. 수치해법

앞에서 유도한 지배방정식은 유한차분법(FDM)으로 수치 근사화하여 계산하기로 한다.

수치해석법에서 바람응력, 정수면 이하 해저면까지의 수심 및 코리올리력은 점 i 에서 주어지는 것으로 하고 S, D, V 는 점 $i+1/2$ 에서 계산된다. 이를 기초로 하여 식 (11), (12), (13)을 차분근사식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{V_{i+1/2}^{n+1} - V_{i+1/2}^n}{\Delta t} \\ &= \frac{1}{4} [(B_i + B_{i+1})^n + (B_i + B_{i+1})^{n+1}] \\ & - KV_{i+1/2}^{n+1} | V_{i+1/2}^n | (D^{-2})_{i+1/2}^{n+1/2} \end{aligned} \quad (15)$$

$$(\Delta S_x)_{i+1/2}^{k+1} = \frac{\Delta x}{2gD_{i+1/2}^{k+1}} (A_i + A_{i+1})^{k+1} \quad (16)$$

$$(\Delta S_y)_{i+1/2}^{k+1} = \frac{\Delta x}{2gD_{i+1/2}^{k+1}} (f_i + f_{i+1}) V_{i+1/2}^{k+1} \quad (17)$$

이때 \bar{B} 는 특정시간에서 공간평균을 나타내고, A,B 는 다음과 같이 정의한다.

$$A = k W^2 \cos \theta \quad (18)$$

$$B = k W^2 \sin \theta \quad (19)$$

한편, 식 (15)를 더욱 확장하여 이항정리하면 최종적으로 식(20)이 된다

$$\begin{aligned} & V_{i+1/2}^{k+1} \\ &= \frac{\frac{1}{4} [(\overline{B_i + B_{i+1}})^k + (\overline{B_i + B_{i+1}})^{k+1}] \Delta t + V_{i+1/2}^k}{1 + K | V_{i+1/2}^k | \Delta K (D^{-2})_{i+1/2}^{k+1/2}} \end{aligned} \quad (20)$$

계산순서를 나타내는 시점은 k 를 이전시점, $k+1$ 은 새로운 시점으로 정의한다. $D_{i+1/2}$ 은 x_i 와 x_{i+1} 의 중앙점에서 총 수심을 나타내는데 특정지점에서의 수심은 평균수심, 폭풍으로 인한 해면상승 뿐만 아니라 압력, 천문조 및 정상해

면으로부터 출발할 때 해면의 초기치 등에 좌우된다. 따라서 두 시간간격의 중간에서 총 수심은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & D_{i+1/2}^{k+1} \\ &= \frac{d_i + d_{i+1}}{2} + S_e + S_A^{k+1} + (S_x + S_y)_{i+1/2}^k \\ & + \frac{[(S_{\Delta p})_i + (S_{\Delta p})_{i+1}]^{k+1}}{2} \end{aligned} \quad (21)$$

폭풍에 의한 상승치의 x, y 성분은

$$S_x = \sum_{j=1}^n (\Delta S_x)_j \quad (22)$$

$$S_y = \sum_{j=1}^n (\Delta S_y)_j \quad (23)$$

여기서 S_e 는 초기 평균해면 상승치, S_A 는 천문조에 의한 상승치를 나타내고, $S_{\Delta p}$ 는 기압강하로 인한 해면상승치를 가리킨다. 압력을 hPa로 하여 상기 압력차로 인한 해면 상승량을 정리하면 식(24)와 같아진다.

$$S_{\Delta p} = 0.991(p_n - p_o)(1 - e^{-R/r}) \quad (24)$$

여기서 R 및 r 은 횡단선을 따라 태풍의 중심에서 최대풍속 및 계산지점까지의 거리이다. 이로 인한 해면의 상승량은 단위가 cm이다.

해안에서 총 해면 상승량은 기상고조에 직접적으로 관계된 여러 성분 및 이와 무관한 성분을 합하여 다음 식과 같이 계산할 수 있다(이, 1989).

$$S_T = S_x + S_y + S_{\Delta p} + S_e + S_A + S_w + S_L \quad (25)$$

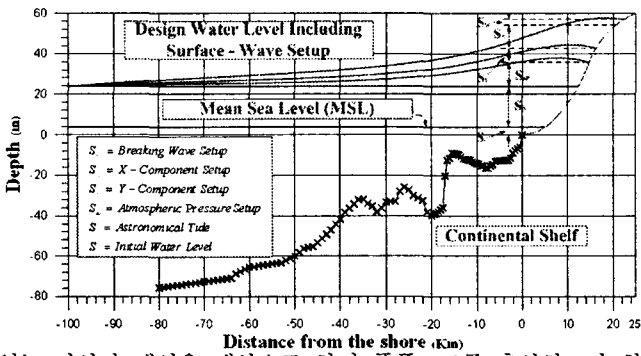
여기서 $S_w = \alpha H_B$ 로 쇄파대에서 해안측의 파랑으로 인한 해면상승치, H_B 는 쇄파고, α 는 계수로 약 0.1~0.2 의 값을 갖는다. 지역적 해면상승 혹은 하강 S_L 은 내륙하천으로부터의 유입이나 연안만류 혹은 해안선 모양, 해저형상 등 연안해역의 지형적 특징으로 인해 계산된 수위로부터 해면의 변화부분을 나타낸다.

Fig. 2. A profile of the various setup components at a typical coastal region

4. 수치실험 및 결과

4.1 모델의 적용

고조의 예측을 위해 본 연구에서는 상당한 매립이 진행되고



있는 마산만 해역을 대상으로 하여 폭풍고조를 추산하고자 한다. 고려한 폭풍은 2003년 9월에 강타했던 100년 빈도를 가진 태풍 Maemi의 경우이며 이로 인해 연구지역에서 최고고조의 높이를 수립한 모델을 통해 산정해 보기로 한다. Maemi의 관측으로부터 선택한 기본 파라메타는 다음과 같다.

<Maemi>

$$CPI = 955hPa, P_n = 1013.25hPa$$

$$R = 35NM$$

$$V_F = 37.0Km/hour, V = 136.8Km/hour$$

Fig.3은 태풍 매미의 이동경로와 최대중심기압 및 풍속을 나타낸다. 적용한 연구지역의 해안선과 외해측 수심의 특성은 앞에서 보인 Fig.2의 해저단면도에 나타난 바와 같다. 횡단선을 따라 입력된 MLLW이하의 수심과 거리는 Table 1에 정리하였다. 횡단선은 보통 개방해안에서의 조석을 기록할 수 있으며 과거의 고조에 대한 기록이 있는 지점을 폭풍의 경로를 고려하여 선택한다. 여기에서는 가덕도 남단에서 가덕수도, 진해만을 거쳐 마산만에 이르는 횡단선(Traverse line)에 대해 수행하기로 한다. 이 횡단선은 저면 등심선에 대해 개략적으로 직각을 이루며 고조의 특징을 파악하기 위하여 폭풍의 경로는 횡단선의 동쪽 및 서쪽으로 약 35NM 정도 떨어져서 횡단선과 나란하게 진행하는 것으로 한다. 계산의 마지막 위치점은 위도 35° 12' 6" N인 마산만의 북측해안선이다. Fig.2는 마산만 북안에서부터 가덕수로 연장선상의 외해쪽으로 횡단선을 따라 등심선 60m까지의 해저단면을 나타낸다.

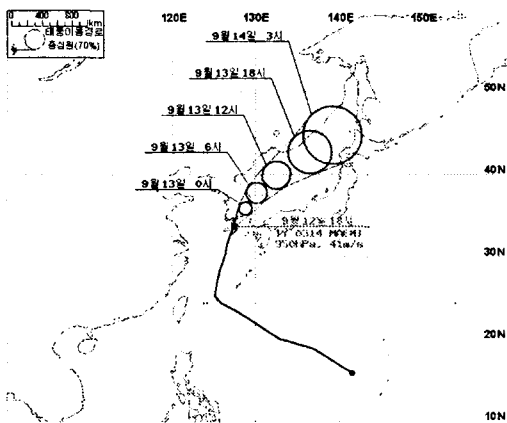


Fig. 3. The best track of typhoon Maemi(2003)

폭풍고조계산에서 초기해면상승치는 일반적으로 계산하고자 하는 지점에서 검조소의 조석 관측치와 추산치의 차이를 평균한 값을 사용하고 수치계산에서는 단순히 일정한 값을 총해면에 가산한다. 특히, 폭풍이 도착하기 2일전의 값을 평균하여 처리하게 되는데 여기에서는 15cm를 도입하였다. 한편, 계산에서 천문조는 2가지로 나누어 도입하였다. 먼저 태풍 Maemi가 실제로 통과한 2003년 9월 5일에서 7일간의 조석자료를 이용하거나, 1년동안 이해역에 대한 조석의 특징을 파악하여 대조시와 소조시의 조석을 입력치로 하여 다루었다. 특히 태풍이 통과한 시기는 대조와 일치하는 시점이라 소조시의 특징을 구분하여 다루었다.

Table 1. Seabed profile over the continental shelf

distance (Km)	depth (m)	distance (Km)	depth (m)	distance (Km)	depth (m)	distance (Km)	depth (m)
80	75.7	55	63.9	30	33.3	12.5	12
79	75.4	54	63.6	29	33.1	12	12.2
78	75.1	53	63.4	28	33	11.5	12.4
77	74.8	52	62.3	27	28	11	13.1
76	74.5	51	61.2	26	26	10.5	13.6
75	74.2	50	60.1	25	27.3	10	14
74	73.9	49	58.2	24	30.1	9.5	14.2
73	73.6	48	56.3	23	31.3	9	15.2
72	73.3	47	55.6	22	32.5	8.5	15.3
71	73	46	55.3	21	38.2	8	16.5
70	72.7	45	53.4	20	40	7.5	16.6
69	72.4	44	51.3	19.5	39.4	7	15.4
68	72.1	43	49.3	19	38.8	6.5	14.6
67	71.8	42	47.1	18.5	38	6	12.9
66	71.5	41	44.2	18	37.1	5.5	12.8
65	71.2	40	41.8	17.5	36	5	12.7
64	70.9	39	38.3	17	20.3	4.5	12.7
63	68.7	38	36.4	16.5	12.6	4	12.7
62	67.6	37	34.3	16	11.5	3.5	12.6
61	66.5	36	32.1	15.5	8.8	3	12.6
60	65.4	35	32	15	9.1	2.5	11.5
59	65.3	34	34.1	14.5	9.4	2	8.9
58	64.8	33	35.2	14	9.8	1.5	7.8
57	64.5	32	38.1	13.5	10.7	1	6.8
56	64.2	31	36.2	13	11.8	0.5	5.9

4.2 수치실험 결과

Fig.5~Fig.6은 해안선에서 시간에 따른 폭풍고조 파라메타의 계산결과를 나타낸 것으로 Fig.5는 태풍 Maemi가 한반도를 통과한 2003년 9월 11일에서 13일의 소조기 조석 예측치를 도입한 것이며, Fig.6은 대조시의 예측치를 도입한 것이다. 각 그림에서 Left는 횡단선의 좌측을 35NM 떨어져서 폭풍의 중심이 이동한 경우를 나타낸다. 전반적으로 횡단선의 좌측을 통과한 경우에는 바람으로 인한 해면은 상승하고 있고, 우측을 통과한 경우에는 감소하여 wind setup 및 wind setdown 현상을 재현하게 된다. 조석의 고조가 wind setup과 다른 파라메타들이 일치하는 경우에는 해면이 상당한 높이까지 상승하고, 저조가 wind setdown과 일치될 경우에는 평균해면이하로 크게 내려가게 된다. Fig.5~Fig.8의 결과에서

호안 등 해안방호구조물의 설계는 wind setup이 고조시와 결합된 최고조위로 하여야 함을 알 수 있다.

한편, Fig.7~Fig.8은 거리에 따른 계산의 결과를 나타낸 것으로 모델에서 15시간을 경과한 경우이다. 여기에서도 역시 Left가 해안에서 해면상승을 Right가 해면하강을 나타내고 있어서 폭풍고조에 의한 영향을 쉽게 이해할 수 있다.

연구대상해역 입구에서 총 평균해면상승의 원인이 되는 폭풍고조의 파라메타를 시간에 따라 요약한 결과는 Table 2에서와 같이 이 폭풍에 대한 최고고조가 4.6m라는 것을 알 수 있다. 표로 나타난 전체해역에서 최고고조는 정확하게 추산되어지지만 총 해수위에 관한 값은 조위변화에 따른 보정이 필요하다. 이러한 보정은 현장의 조석치나 조석 예보치로부터 도입할 수 있다. Fig.4는 수치실험 및 현장조사 결과 해안선을 따라 침수가 발생된 영역에서 대표적인 침수원인 및 수위를 나타낸다.

본 연구에서는 해안에서 파랑의 변형에 따른 고조의 영향을 검토하지 않았기 때문에 파로 인한 평균해면상승은 앞에서 계산한 총 평균해면상승의 인자로는 계산되지 않았다. 또한, 지역의 해저형상, 만 입구(inlet)의 영향과 같은 또 연구대상해역 입구에서의 강수 및 하천 유출수 등이 총 수위에 영향을 미칠 것이나, 여기서는 실험에서 이를 무시하는 것으로 하였다.

Table 2. Summary of Numerical Simulation

수위상승인자	표준태풍 (저조, m)	표준태풍 (고조, m)	태풍매미 (저조, m)	태풍매미 (고조, m)
바람상승(전체)	-0.2~2.3	-0.2~2.4	-0.3~2.3	-0.2~2.4
해안과직교	-0.2~1.7	-0.2~1.8	-0.2~1.7	-0.2~1.8
해안과평행	-0.4~0.8	-0.3~0.8	-0.4~0.8	-0.4~0.8
천문조	0.9~1.9	0.2~2.6	0.9~1.9	0.2~2.6
전조(초기해면)	0.15~0.3	0.15~0.3	0.15~0.3	0.15~0.3
기압상승	0.0~0.5	0.0~0.5	0.0~0.4	0.0~0.4
총수위상승량	1.4~4.5	0.4~3.9	1.1~4.6	0.4~3.3

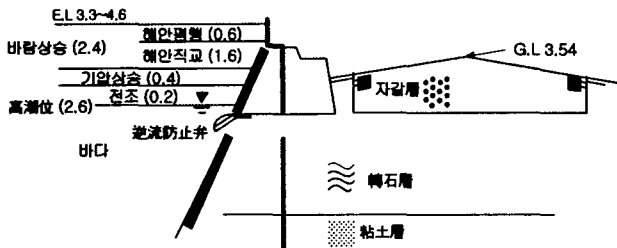


Fig. 4. Analysis of flood due to storm surge along the coast

4.3 침수원인분석 및 대책

이상의 결과와 현장조사를 통해 해안역에서 발생한 침수원인은 두가지로 대별하여 대상역의 자연지형적 특성과 대규모 매립이라는 인공적인 인자가 결합된 것으로 분석되었다. 즉, 자연적 여건으로는, i) 마산만이 거대해역과 연결된 길이 10km, 폭 2km의 장방향 만이 남북으로 발달해 있어서 지속적으로 해양으로 바람의 에너지를 받을 수 있었으며, ii) 해안선과 직각방향 태풍 상륙

시 고조의 영향이 4.52m(해양조사원의 조사) 상승하였고, iii) 특히, 태풍 매미는 발생빈도 100주기 이상의 거대 태풍으로 기록되어 사라호 보다 큰 수준이었다. 또한, 작지만, 위치적인 특성으로 온난화로 수위 상승과 조차가 과거보다 증가한 것도 일조한 것으로 판단된다. 한편, 인위적인 요인으로는 i) 마산만 해안도시의 발달이 일제시대부터 시가지 형성이 해안의 저지대에 집중되어 인구밀집지역에 재개발을 위한 이주 불가능한 점과, ii) 저지반에 상업시설의 증가(저지대 44%, 190만ha) 및 우수관로 정비없이 기존도로에 의존하여 우기에 상승적인 침수구역이 존재하고 있는 점이 치명적이었다고 본다.

장래의 재해에 대비하기 위한 대책으로는 저지대 구 시가지를 주민의 이주나 도시 재정비가 필연적이나 현재의 시가지 형성특성을 볼 때 추진 가능성은 희박하다. 따라서, i) 우수관, 우수관의 분리 및 재정비(하수처리장 신설 및 연계), ii) 노후 해안 호안 재정비 및 지반고 높임, iii) 차수벽 설치 및 역류방지밸브 및 스크린 정비, iv) 중계 펌프장 설치로 우기 및 대도시 상습 침수구역에서 강제 배수를 행한다. 그러나, 이런 대책은 단기적인 관점이고 장기적으로는 i) 해안매립역의 단지고 기준을 높임, ii) 방파제, 호안 및 안벽 설계기준의 강화, iii) 해안 녹지 공원(완충지대) 및 저지대 유수지 조성, iv) 해안매립지 주위 지하공간 수해 대책 수립(수문설치, 유로확보), v) 항만계획수립시 Zone계획 반영하여 거주지 및 상업지 연계 대상을 정리하여야 할 것이다.

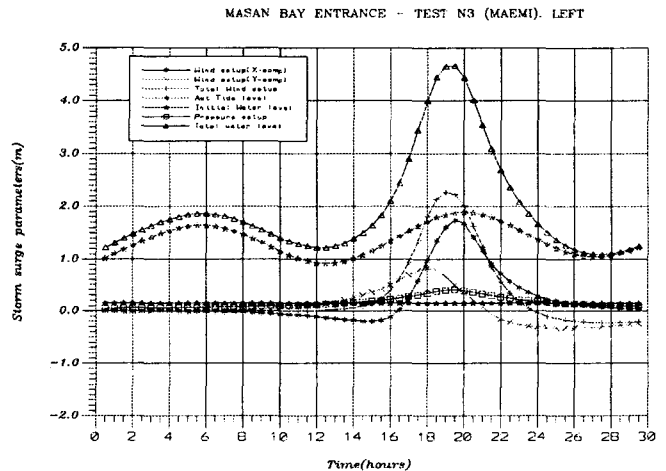


Fig. 5. Computed surge hydrographs in terms of time for Maemi at neap tide period

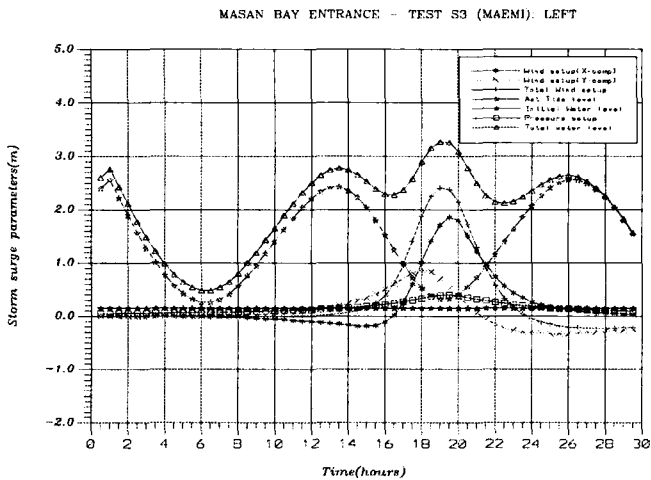


Fig. 6. Computed surge hydrographs in terms of time for Maemi at spring tide period

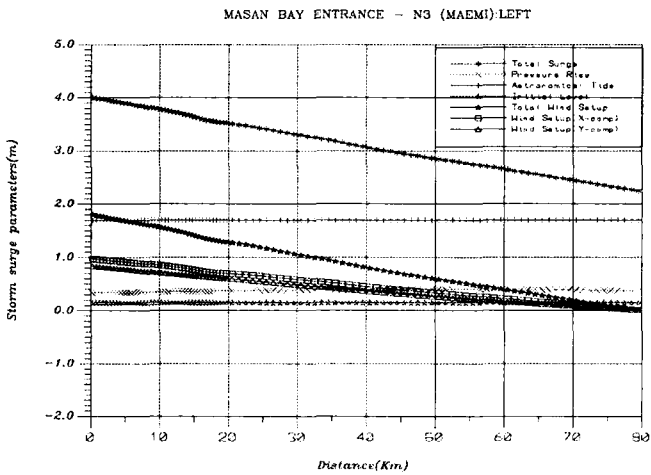


Fig. 7. Computed surge hydrographs in terms of distance for Maemi at neap tide period

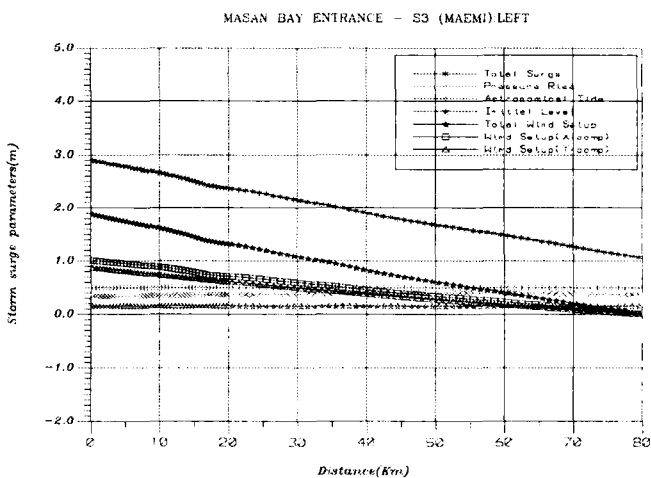


Fig. 8. Computed surge hydrographs in terms of distance for Maemi at spring tide period

5. 요약 및 결론

태풍이 해안으로 이동할 때 기상 및 해양의 특성과 천문 조의 결합으로부터 발생하는 폭풍고조의 예측은 해안구조물의 계획 및 설계에 매우 중요하다. 최근 원자력발전소, 초대형항만구조물 등, 대규모의 해안시설의 꾸준한 수요와 더불어 이들을 보전하기 위해서는 폭풍고조가 가진 잠재력을 추산하는 것이 필연적이다. 본 연구는 태풍으로 인한 고조의 예측을 수치 모델을 통해서만 기초적으로 다루어 보았다.

여기서는 마산만 북단해안에서 횡단선을 따라 태풍 Maemi의 파라메타를 사용하여 횡단면의 좌측을 폭풍의 중심이 통과할 때 횡단면을 따라 폭풍고조를 추산하여, 이론적인 배경을 이해하도록 노력하였으며 추후 더욱 정확한 모델로의 접근을 유도할 목적으로 시도하였다. 모델실험을 통한 폭풍고조의 계산은 도입한 폭풍파라메타에 따라 수행되었으며 그 결과를 시간별, 거리별로 도식화하였다.

도입된 수치모델은 전향력의 효과를 고려한 해역회전근사의 폭풍고조이론에 기초하였고, 해안선에 직각방향 및 나란한 방향의 바람응력성분과 전향력의 효과 등 해면에 직접 영향을 미치는 인자를 수력학 운동방정식 및 연속방정식에 적용하여 개방해안에서의 해면변화를 추정하였다.

본 연구에서 도입한 모델이 실제로 이용될 수 있음을 나타내어 보였지만 계산에 사용된 초기해면상승치, 바람응력, 티저 마찰 및 이들의 상호관계는 적절하게 도입할 수는 없었다. 그 이유는 다음과 같다.

- i) 조석관측기록으로부터 과거의 태풍과 관계된 초기해면상승치를 찾아낼 표준이 없으며, 더구나 초기해면상승은 태풍과 독립적으로 발생한다.
- ii) 폭풍고조의 계산에서 해저마찰은 수심과 외해의 저지형상태의 함수로 알려져 있는데 모델에서는 독립적으로 사용된 해저마찰계수를 결정하기 위한 수단이 없다.
- iii) 해저마찰과 바람응력은 수치계산에서 결합되어 있으나 정확한 바람응력을 계산하는 방법이 미흡하다. 모델에서는 바람응력을 작은 풍속치로부터 보간하거나 외삽하여 계산에 도입하였기 때문에 풍속이 증가하면 해면반응의 체계가 달라져 오차를 유발하게 된다.

그러므로 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해서는 과거의 태풍 및 해면관측기록이 뒤따라야 하고 방재의 관점에서 모델에 도입한 폭풍파라메타의 검정이 필요하다고 사료된다. 추후에는 단일 횡단선이 아닌 실제 폭풍의 경로를 도입한 실험과 이차원적인 모델을 구성하여 관련해역에서의 해면변화를 더욱 정확하게 시도해볼 생각이다.

참고 문헌

- [1] 이종우(1989), 태풍파를 기준으로한 전설계수심의 선정에 관한 연구, 한국항해학회지 제13권, 제3호, pp.45~65.
- [2] Bodine, B. R.(1971), "Storm Surge on the Open

Coast Fundamentals and Simplified Prediction," U.S. Army, Corps of Engineers, CERC Tech. Memo. No. 35.

[3] Bretschneider, C. L. and J. I. Collins(1963), "Prediction of Hurricane Surge: An Investigation for Corpus Christi, Texas and Vicinity", National Engineering Science Co., Technical Report No. SN-120.

[4] Freeman, J. C. Jr., Baer, L., and C. H. Jung (1957), "The Bathystrophic Storm Tide", Journal of Marine Research, Volume 16, No. 1.