

폭풍고조로 인한 영도 해안 해수면 변화 연구

Coastal Water Level Variations due to Storm Surges in Yeongdo Island

이종우*

Lee, Joong-Woo

1. 서론

개방해역에서의 폭풍고조의 계산은 특히 해안역의 개발 계획, 건설 작업 및 해안 재해 방지 분야에서 중요하다. 해양 및 연안의 이용과 활동범위가 크게 신장되면서 항만 및 해안과 같은 워터프론트에서 태풍 및 폭풍과 같은 자연재해로부터 효과적인 방재의 요구도 커지게 되었다. 특히, 지난해 태풍 매미의 내습으로 우리나라 남해안을 강타한 것은 물론 부산권의 해안선과 함께 영도 해안선에서의 피해도 상당히 나타났다. 자연재해로부터 피해를 감소시키고 해안선 활용을 높이기 위해서 방재에 필요한 기본자료를 제공하는 것은 의미가 크다고 본다.

본 연구에서는 부산의 영도가 가진 지리적 특성으로 항만 및 부산시가지 중심권을 보호하고 있다는 점에서 영도의 해안선을 따라서 발생하는 해일로 인한 수면변화에 대한 예측과 분석의 결과는 부산시 방재에 중요한 자료를 제공할 것으로 보며 영도구 자체의 방재계획에도 필연적인 것이 될 것으로 본다.

폭풍고조로 인한 해수면 변화를 예측하기 위한 도구로 수치모델을 이용하기로 한다. 모델에서 여러 가지 가정, 유효범위, 적용성을 이해하기 위하여 먼저 태풍과 폭풍의 발생과정을 좌우하는 물리적 인자들에 대하여 분석하기로 한다. 본 논문에서 적용할 기본방정식은 폭풍고조의 기초 지배방정식을 축약시킨 것이다. 최종적으로 수립한 모델을 부산항의 해안선 특히 영도연안역을 중심으로 폭풍고조의 문제에 적용하여 천문조, 초기수면, 대기압에 따른 수위상승의 효과를 검토하였으며, 영도 해안역에서의 폭풍고조로 인한 수위상승과 발생한 침수인자를 분석하고, 침수재해방지를 위한 합리적인 제안도 검토하기로 한다. 이 과정에서 영도를 포함한 부산항 해안선에서 태풍 매미로 인한 피해특성과 폭풍해일의 규모를 좌우하는 풍향, 풍속, 조위변화 및 이와 병행한 극한파랑의 변화 등을 분석하여 재난 방재에 활용할 수 있도록 의도하였다.

* 한국해양대학교 토목환경시스템공학부 교수, Tel : 051-410-4461, E-mail : jkpr@hhu.ac.kr

II. 이론적 배경

태풍의 발생과 그 영향으로 인한 해면의 변화예측은 항만건설 및 해안지역을 개발하고 재해에 대비하는 데에 필연적이라 할 수 있다. 태풍으로 인한 수위의 변화예측은 물리모델에서나 실제 현장에서 다루기가 매우 어렵기 때문에 수치모델에 주로 근거를 둔다. 해안에서 고조의 예측은 간단하게 준이차원 수치해석방법으로 행할 수도 있다. 이 방법은 지구 자전에 의한 연안류효과를 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. 또한, Bodine(1971)은 해역회전근사이론으로부터 2차원에 준하는 모델을 수립하였다. 본 연구에서는 준이차원 모델과 함께 수심평균 2차원 운동방정식과 연속방정식으로부터 출발한 폭풍고조의 지배방정식은 해저응력 및 해면응력, 해안, 해저, 해면 및 개방 경계조건을 도입하여 2차원 모델을 구성하고, 영도를 포함한 해역을 대상영역으로 하여 모델에 도입한다. 선택한 영도해안은 한반도의 남해안에 위치하여 태풍의 직접적인 영향권에 쉽게 노출되어 있으므로 이로 인한 고조를 수치해석으로 계산하는데 적합한 해역으로 사료된다.

본 연구에서는 해안역에서 침수원인이 되는 고조 및 이와 병행한 극한파랑의 분석을 위해 최근 100년 빈도의 태풍이라고 하는 2003년도의 태풍 매미를 선정하고 이것이 지닌 태풍파랑 메타를 이용하기로 한다.

1. 고조 적용 방정식

폭풍고조에 적합한 기초 방정식으로 체적수송의 방법을 사용하며, 총 수심에 대해 수직으로 지배방정식을 적분하여 구한다. x 방향은 해안선에 대해 수직 방향으로 해안선을 향하고 y 방향은 해안선과 나란한 것으로 할 때 이차원 지배방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{M_{xx}}{\partial x} + \frac{M_{xy}}{\partial y} \\ & = fV - gD \frac{\partial S}{\partial x} + gD \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho} - W_x P \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial M_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} \\ & = -fU - gD \frac{\partial S}{\partial y} + gD \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho} - W_y P \end{aligned} \quad (2)$$

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

식 (1)과 (2)는 운동방정식을, 식 (3)은 비압축성유체에 대한 연속 방정식을 나타내며, 여기서 사용된 기호는 다음과 같다.

이때 $U, V =$ 단위폭당 체적 수송의 x, y 성분, $U = \int_{-d}^S u \, dz, V = \int_{-d}^S v \, dz,$

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

시간 및 공간에 따른 자유해면의 변화 (평균해면으로 부터의 거리), $d =$ 평균 해면에서의 수심, $t =$ 시간, $D =$ 시간 t 에서 전수심 ($S+d$), $\phi =$ 위도, $f = 2\omega \sin \phi$, 코리올리계수, $\omega = 2\pi/24$, 지구의 각속도, $\tau_{xx}, \tau_{yy} = x$ 방향 해면 및 해저면 응력, $\tau_{xy}, \tau_{yx} = y$ 방향 해면 및 해저면 응력, $\rho =$ 해수 밀도, $W_x, W_y = x, y$ 방향 풍속, $\xi =$ 해면기압감소, $u, v = x, y$ 방향 유속, $P =$ 강수율(깊이/시간), $g =$ 중력가속도를 나타낸다.

해저와의 응력관계를 수송식으로 나타내면

$$\frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{KV|V|}{D^2} \quad (4)$$



여기서 V 는 유속의 y 방향 성분을, K 는 무차원 해저마찰계수이고, Chezy계수 C 와 Darcy-Weisbach마찰인수 f 를 사용하여 식 (5)와 같이 정리할 수 있다.

$$K = \frac{g}{C^2} = \frac{f}{2} \quad (5)$$

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.

$$\tau_s = \rho k W^2 = \rho k W |W| \quad (6)$$

이 때 k 는 무차원 해면마찰계수를, W 는 풍속을 나타낸다. 표준관측치를 사용하기 위해서는 해면으로부터 10m 높이에서, 10분간의 평균풍속을 취한다. 식 (6)의 해면응력을 최종적으로 정리하면 식 (7)과 같다. 이때 θ 는 x 축과 풍향이 이루는 각을 나타낸다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau_{sx}}{\rho} &= kW^2 \cos \theta \\ \frac{\tau_{sy}}{\rho} &= kW^2 \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

해면 상승치의 연안방향에 미치는 영향은 식 (2), (3)을 다음 식 (8) 및 (9)의 형태로 분리하여 생각한다.

$$\frac{\partial S_x}{\partial x} = \frac{kW^2 \cos \theta}{gD}, \quad \frac{\partial S_y}{\partial y} = \frac{kW^2 \sin \theta}{gD} \quad (8)$$

$$\frac{\partial S_y}{\partial x} = \frac{fV}{gD}, \quad \frac{\partial S_x}{\partial y} = -\frac{fU}{gD} \quad (9)$$

따라서 x, y 축을 따라 총 평균해면상승은 이 둘을 합한 식 (10)이 된다.

$$\frac{\partial S}{\partial x} = \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial x}, \quad \frac{\partial S}{\partial y} = \frac{\partial S_x}{\partial y} + \frac{\partial S_y}{\partial y} \quad (10)$$

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

$$S_T = S_x + S_y + S_{\Delta p} + S_e + S_A + S_W + S_L \quad (11)$$

이 때 $S_{\Delta p}$ 는 기압강하로 인한 해면상승치, S_e 는 초기 평균해면 상승치, S_A 는 천문조에 의한 상승치를 가리킨다. 압력을 hPa로 하여 평상시 대기압에 대해 중심압력차로 인한 해면 상승량 $S_{\Delta p}$ 를 정리하면 식(12)와 같아진다.

$$S_{\Delta p} = 0.991(p_n - p_o)(1 - e^{-R/r}) \quad (12)$$

여기서 R 및 r 은 횡단선을 따라 태풍의 중심에서 최대풍속 및 계산지점까지의 거리이다. 이로 인한 해면의 상승량은 단위가 cm이다. $S_W = \alpha H_B$ 로 쇄파대에서 해안측의 파랑으로 인한 해면 상승치, 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.

2. 극한 파랑 적용 방정식

쇄파대에서 해안방향으로의 해면상승치는 연안해역에서 극한 파랑을 입력조건으로 하여 해안선에서의 수위변화와 연계하여야 한다. 이를 위해서 파랑의 천수효과, 굴절, 회절, 부분반사, 해저마찰, 쇄파의 영향까지를 고려한 파랑모델을 도입하여 파랑변환과정에서 복잡한 연안역의 해저변화 및 해안선 변화의 제 조건을 만족시킬 필요가 있다.

이에는 식 (13)과 같이 2차원 타원형 완경사 파랑방정식을 활용할 것이나 해저면의 마찰 및 쇄파 조건을 고려하여 식 (14)의 확장완경사방정식을 사용하기로 한다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \hat{\eta} = 0 \tag{13}$$

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + \left(-\frac{C_g}{C} \sigma^2 + i\sigma w + iC_g \sigma \gamma \right) \hat{\eta} = 0 \tag{14}$$

여기서 $\hat{\eta}(x, y)$ = 복소해면변동함수, σ = 각주파수 (radians/sec), $C(x, y)$ = 위상속도(phase velocity) = σ/k , $C_g(x, y)$ = 군속도 (group velocity) = $\frac{\partial \sigma}{\partial k} = nC$, $n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$, $k(x, y)$ = 수심 $d(x, y)$ 에서 선형분산관계식 $\sigma^2 = gk \tanh(kd)$ 를 만족하는 파수 (= $2\pi/L$) 를 가리킨다. 또한, w 는 마찰항이고, 식 (15)와 같이 진폭감쇄계수를 사용한 Dalrymple et al.(1984)의 식을 적용한다. γ 는 쇄파파라메타(= $\frac{0.15}{d} \left(1 - \frac{0.16d^2}{4a^2} \right)$) 이다. 한편, $\alpha(=H/2)$ 는 파랑의 진폭, f_r 은 마찰계수이다.

$$w = \left(\frac{2n\sigma}{k} \right) \left[\frac{2f_r}{3\pi} \frac{ak^2}{(2kd + \sinh 2kd) \sinh kd} \right] \tag{15}$$


비선형파의 시뮬레이션은 진폭의존 파랑분산을 고려한 비선형 산란관계식으로 정리하여 적용한다.

$$\sigma^2 = gk [1 + (ka)^2 F_1 \tanh^5 kd] \tanh \{ kd + ka F_2 \} \tag{16}$$

이 때 $F_1 = \frac{\cosh(4kd) - 2 \tanh^2(kd)}{8 \sinh^4(kd)}$, $F_2 = \left(\frac{kd}{\sinh(kd)} \right)^4$ 이다. 지배방정식과 경계조건을 고려한 수치모델의 기법, 수치모델의 구성 및 제반 식의 유도는 김 등(2004)을 참조한다.

III. 고조 및 극한파랑의 현장자료 분석

1. 고조 자료 분석

2003년 9월 12일 21시에 경남 사천으로 상륙한 태풍 '매미'는 우리나라 남해안에 기록적인 극한파랑을 발생시켰으며, 당시 태풍으로 인한 폭풍해일과 만조위가 겹침에 따라 특히 마산, 부산 등지에서 많은 재해를 남겼다. <그림 1>은 태풍 '매미'의 이동경로와 최대중심기압 및 풍속을 나타낸다. 천해에서의 해파와 강풍에 의한 해류의 상호작용이 더 중요한 것으로 보고 되고 있고 천해파의 쇄파에 따른 백파(breaking white caps)가 해면 전단력을 크게 증가시켜 높은 해일을 유발시킨다는 이론이 있다.

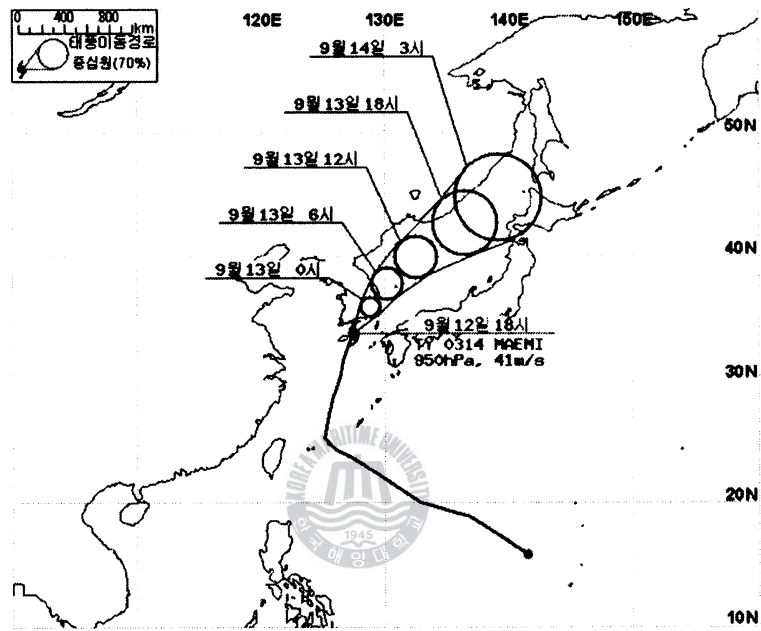


그림1. 태풍 매미(2003)의 이동경로도

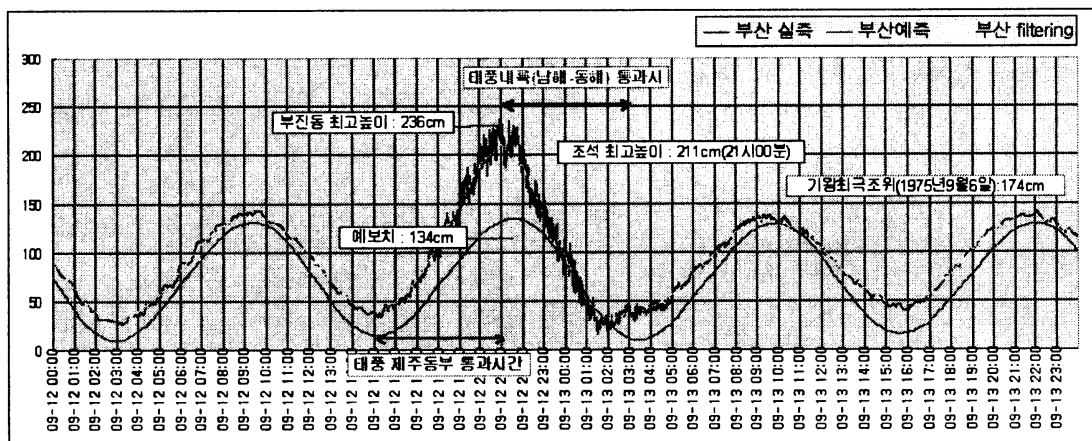


그림2. 부산항에서의 관측 수위 변화도(2003년 9월 12일 ~ 13일)

2. 극한파랑의 분석

한국 기상청의 거제도에서 행한 해상 부이관측은 12일 21시의 최대유의파고가 7m인 것으로 분석하였으며, 파의 주기는 16.7sec, 파향은 332°이었다. 최대파는 16m에 이른 것으로 보고하였다. 3m 이상의 유의파고는 12일 18시부터 다음날 1시까지 지속되는 것으로 관측하는데 앞의 해파 예보결과와도 전반적으로 일치한다. 그러나 가덕도에 비해 거제도 해파관측 위치는 개방된 외해측에서 이루어지고 있어 유의파고가 다소 과소 관측되었으며 최대파는 과대관측이 된 경향이 보이고 있다.

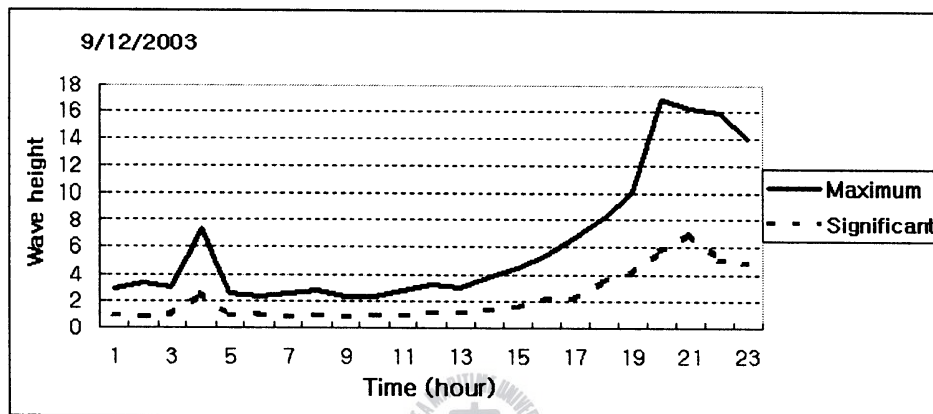


그림3. 거제도 외해에서의 관측파고성분의 시계열도

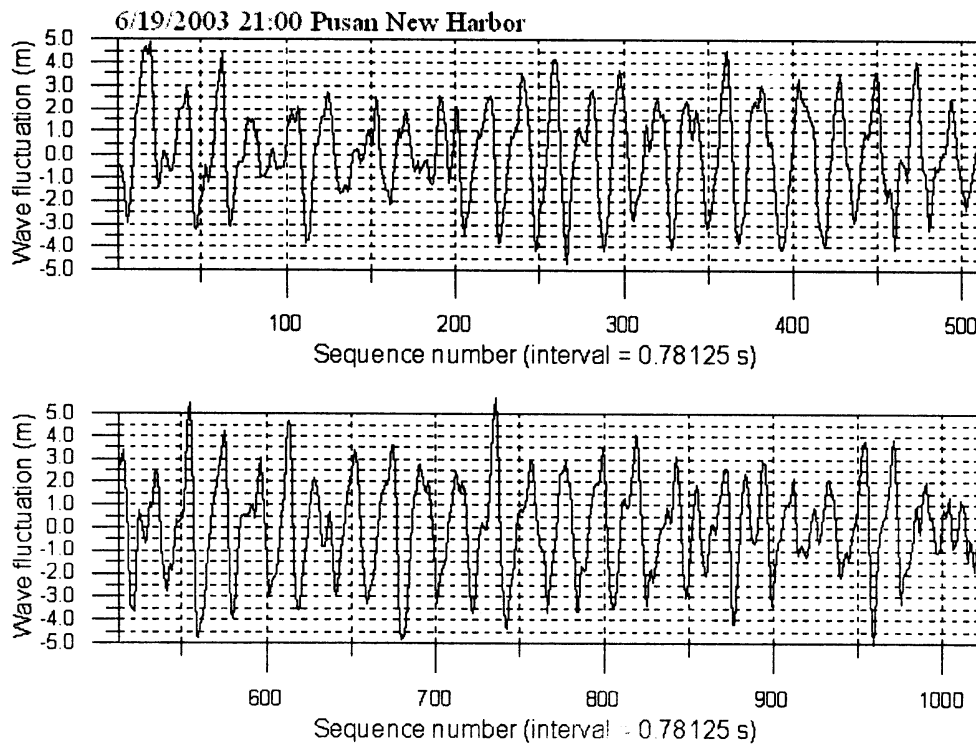


그림4. 부산 신항에서의 파랑기록의 시계열도

연안 해역에서의 정밀도 높은 파랑추산을 위해 수정한 WAM 모형(신 등, 2004)을 적용하여 신과 홍(2004)은 20km 공간격자에 대한 해상풍 자료로부터 동북아시아의 해역에 대해 0.1° 계산 공간격자로 태풍 '매미'의 발생 기간을 포함한 2003년 9월 한 달 동안의 파랑을 추산하였다. 이 계산에서 태풍 '매미'는 제주도 서편 차귀도의 경우 12일 16시, 마산만의 경우 12일 21시, 부산항 입구는 12일 22시, 울산항 입구에서는 12일 23시에 각각 최대 유의파고 7.41m, 12.50m, 13.85m, 11.00m를 기록하였으며, 부산항 전면 해상에서는 2003년 9월 12일 22시에 최대 유의파고 13.85m, 평균 주기 13.81s, 평균 파향 0.2°로 각각 추산하였다.

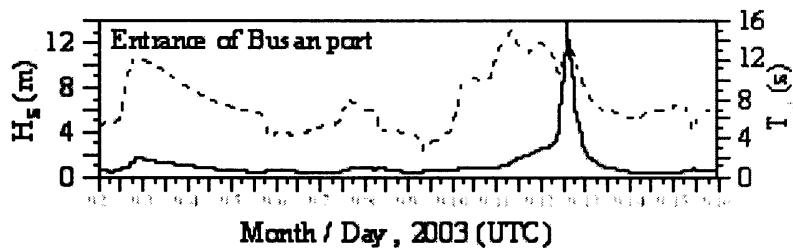


그림5. 부산항 외해역에서 계산파고성분의 시계열도

3. 영도 해안선역 주요 태풍 피해

부산지역에서 태풍 '매미'로 인한 피해는 태풍이 상륙할 당시 만조시간과 겹쳐 해일의 피해가 심해졌으며, 특히 영도 해안선을 따라 발생한 피해는 <그림 6>~<그림 12>와 같다. <그림 6>은 태풍이 도래할 때의 풍향 및 파향의 변화로 인한 주요 피해해안선을 나타낸다.

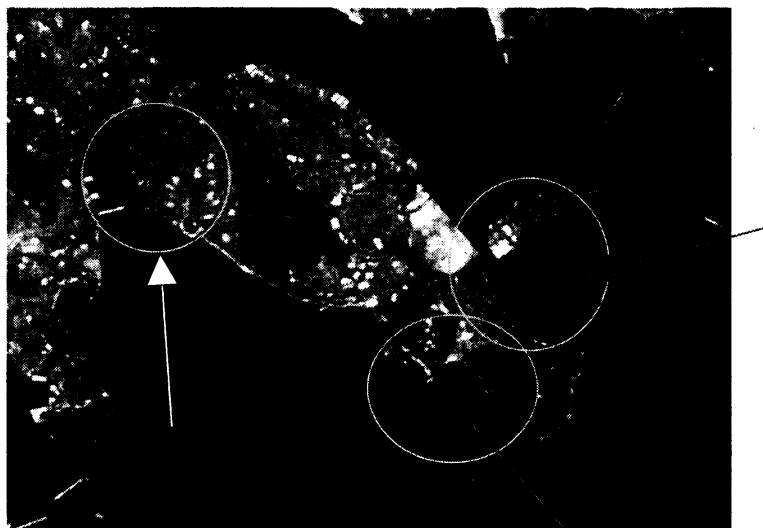


그림6. 부산항 해역에서의 파향의 방향변화와 주요 피해역

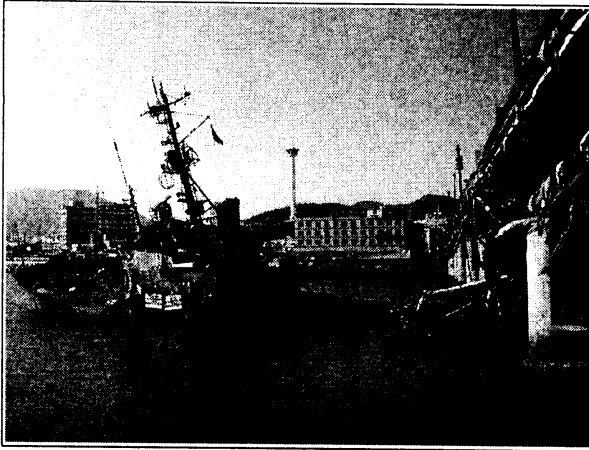


그림7. 어선의 충돌로 인한 영도대교 파손



그림8. 영도 중리 선착장의 범람 피해



그림9. 남항동 해변공단 침수

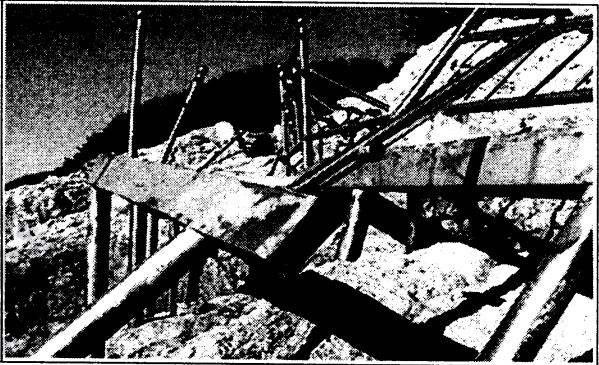


그림10. 절영 해변 산책로 가설 인도 파손

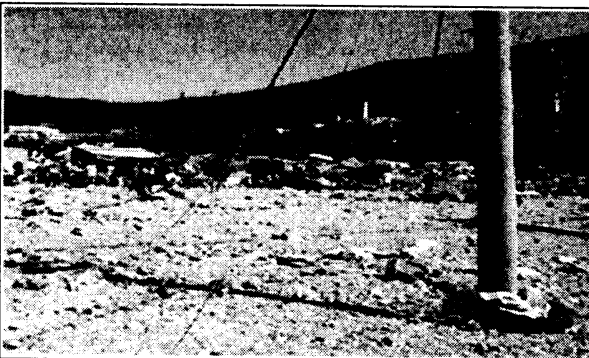


그림11. 동삼동 감지해변의 해일로 인한 침수 피해



<그림 7>은 태풍당시 강한 바람과 파랑에 의해 어선이 반 침수되면서 영도대교 교각에 부딪쳐 어선은 물론 교량의 상판의 파손된 상태를 나타내며, <그림 8>은 중리 선착장에서 해일로 인한 월파 및 침수피해로 인근 거주구역까지 영향을 미쳤던 현장이다. 한편, <그림 9>는 남항동 해변공단의 침수현장을 나타내며, <그림 10>은 절영해변산책로의 가설 인도의 파손상태를 가리킨다. <그림 11>은 동삼동 감지해변의 침수피해로 대부분의 해안구조물이 이동되거나

파손되었음을 나타내며, 또한 조도 한국해양대학교의 방파제 상부 cap 콘크리트가 파손되었으며, 대학내 건물의 피해가 막심하였음을 <그림 12>에서 알 수 있다. 그 외에도 부산 북항의 대규모 철골 갠트리 크레인의 붕괴와 송도해수욕장의 해안가 침수 및 해변유실 등 영도 주변에서의 피해규모도 해운대, 광안리, 가덕 부산신항만, 낙동강 이상으로 극심했다.

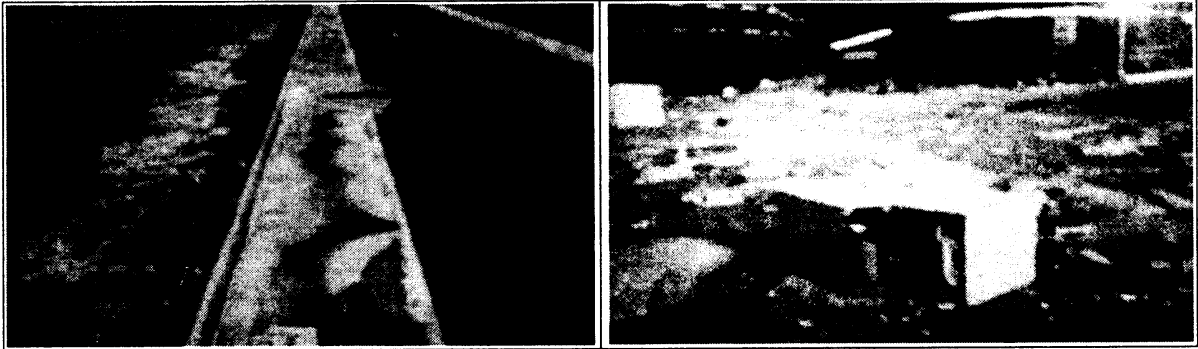


그림 12. 동삼동 조도방파제 및 해양대학에서의 해일로 인한 침수 피해

IV. 수치실험 및 결과

1. 모델의 적용 및 결과

고조의 예측을 위해 본 연구에서는 우리나라 남해권 전역을 포함한 부산권역에서 지역 전체가 개방해역에 노출되어 있는 영도 및 부산항 해역을 대상으로 하여 폭풍고조를 추산하였다. 고려한 폭풍은 2003년 9월에 강타했던 100년 빈도를 가진 태풍 '매미'의 경우이며 이로 인해 연구지역에서 최고고조의 높이를 수립한 모델을 통해 산정해 보기로 한다. 태풍 '매미'의 관측으로부터 선택한 상륙직전의 태풍파라메타는 다음과 같다. 또한, 극한파랑의 변환 계산에 적용한 입사파고는 최대 유의파고 13.0m, 유의파의 주기 13.8s, 입사파향 0°로 하였다.

<Maemi>

$$\begin{aligned} CPI &= 955hPa, P_n = 1013.25hPa \\ R &= 35NM \\ V_F &= 37.0Km/hour, V = 136.8Km/hour \end{aligned}$$

1) 고조계산

광역 폭풍해일 실험 결과, 부산해역에서의 폭풍 해일에 의한 조위 상승고 중 양의 해일고는 40~120cm이고(<그림 13> 참조), 음의 해일고는 -40~-120cm로 평가되었고, 해역에 따라 다소 차이가 있지만 관측치와 거의 비슷한 결과가 나타났다. 영도부근해역에서의 등 고조위선은 <그림 14>와 같다. 영도 중리 전면 해상에서 공간적, 시간적 해면변화를 나타내기 위하여 남형제도 외해측에서 횡단선을 따라 MLLW이하의 수심과 거리는 <표 1>에 정리하였다. 폭풍 고조계산에서 초기해면상승치는 일반적으로 계산하고자 하는 지점에서 검조소의 조석 관측치와 추산치의 차이를 평균한 값을 사용하고 수치계산에서는 단순히 일정한 값을 총해면고로 산한다. 특히, 폭풍이 도착하기 2일전의 값을 평균하여 처리하게 되는데 여기에서는 150

도입하였다.

한편, 계산에서 천문조는 2가지로 나누어 도입하였다. 먼저 태풍 ‘매미’가 실제로 통과한 2003년 9월 5일에서 7일간의 조석자료를 이용하거나, 1년 동안 이 해역에 대한 조석의 특징을 파악하여 대조시의 조석을 입력치로 하여 다루었다. 특히 태풍이 통과한 시기는 대조와 일치하는 시점이다. <그림 15>은 해안선에서 시간변화에 따른 폭풍고조 파라메타의 계산결과를 나타낸 것으로 각각 태풍 ‘매미’가 발생하여 한반도를 통과한 2003년 9월 11일에서 13일의 대조시 조석 예측치를 도입한 것이다.

조석의 고조가 wind setup과 다른 파라메타들이 일치한 경우에 해당하여 해면이 상당한 높이까지 상승한 것으로 나타났다. 이 결과에서 호안 등 해안방호구조물의 설계는 wind setup이 고조시와 결합된 최고조위로 이상으로 하여야 함을 알 수 있다. 또한, <그림 16>은 거리에 따른 계산의 결과를 나타낸 것으로 모델에서 15시간을 경과한 경우로 폭풍고조에 의한 영향을 쉽게 이해할 수 있다. 연구대상해역 입구에서 총 평균해면상승의 원인이 되는 폭풍고조의 파라메타를 시간에 따라 요약한 결과는 <표 2>에서와 같이 이 폭풍에 대한 최고고조가 3.3m로 계산되었다. 표로 나타난 전체해역에서 최고고조는 정확하게 추산되어지지만 총 해수위에 관한 값은 조위변화에 따른 보정이 필요하다. 이러한 보정은 현장의 조석치나 조석 예보치로부터 도입할 수 있다.

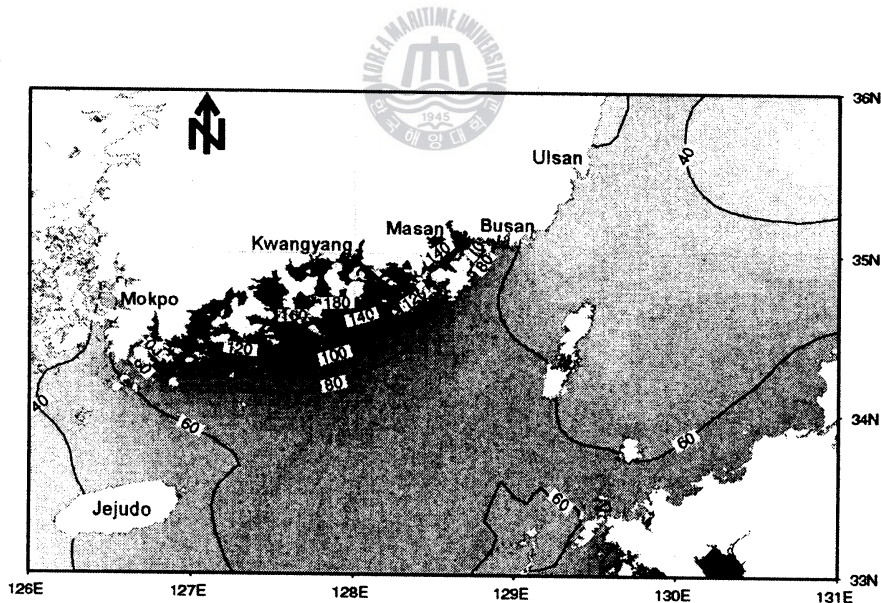


그림 13. 광역권에서의 폭풍고조의 계산

표1. 영도전면 외해에서 해안선까지의 수심변화

distance (Km)	depth (m)	distance (Km)	depth (m)	distance (Km)	depth (m)	distance (Km)	depth (m)
80	78	55	77	30	78	12.5	63
79	76	54	77	29	78	12	63
78	73	53	76	28	80	11.5	61
77	72	52	70	27	79	11	61
76	72	51	70	26	79	10.5	60
75	68	50	80	25	78	10	61
74	67	49	80	24	80	9.5	58
73	66	48	76	23	70	9	57
72	67	47	74	22	65	8.5	54
71	67	46	76	21	65	8	54
70	69	45	77	20	65	7.5	56
69	69	44	77	19.5	66	7	55
68	70	43	78	19	68	6.5	53
67	65	42	79	18.5	70	6	52
66	65	41	81	18	72	5.5	51
65	62	40	83	17.5	72	5	50
64	60	39	82	17	72	4.5	47
63	65	38	83	16.5	70	4	46
62	72	37	80	16	69	3.5	45
61	73	36	80	15.5	66	3	44
60	74	35	83	15	65	2.5	42
59	76	34	82	14.5	64	2	40
58	77	33	82	14	63	1.5	29
57	77	32	80	13.5	63	1	27
56	76	31	79	13	63	0.5	20

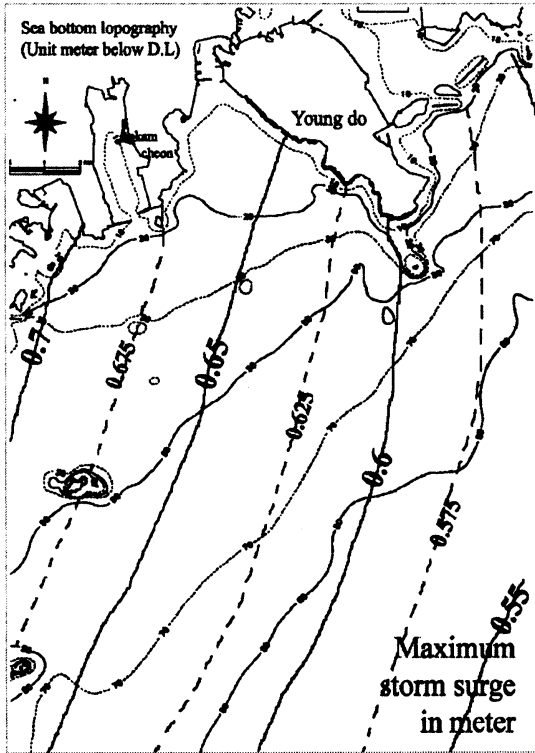


그림14. 영도 근해역에 대한 폭풍고조의 계산

BUSAN BAY ENTRANCE - TEST S1 (MAEMI). LEFT

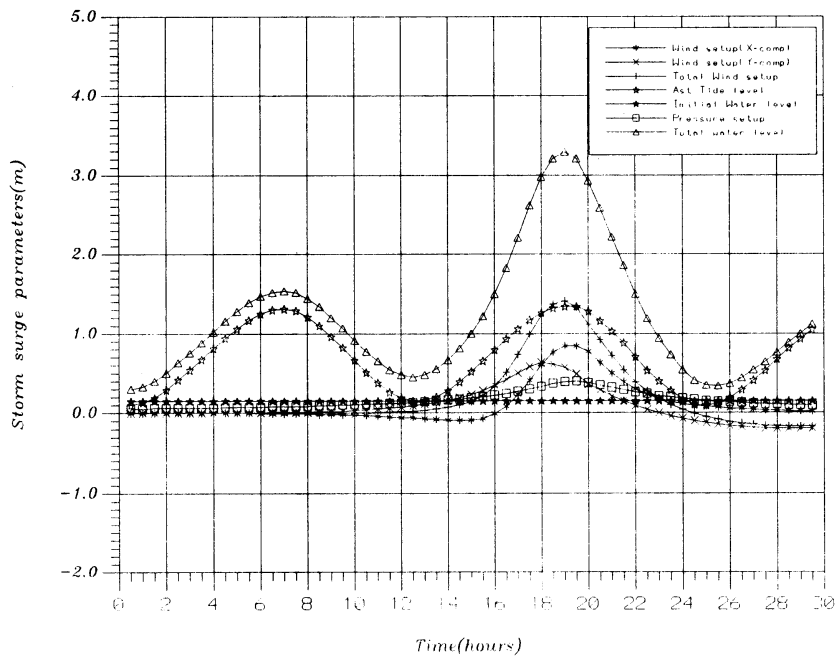


그림15. 대조시 태풍 매미에 대한 계산고조의 시계열 곡선도

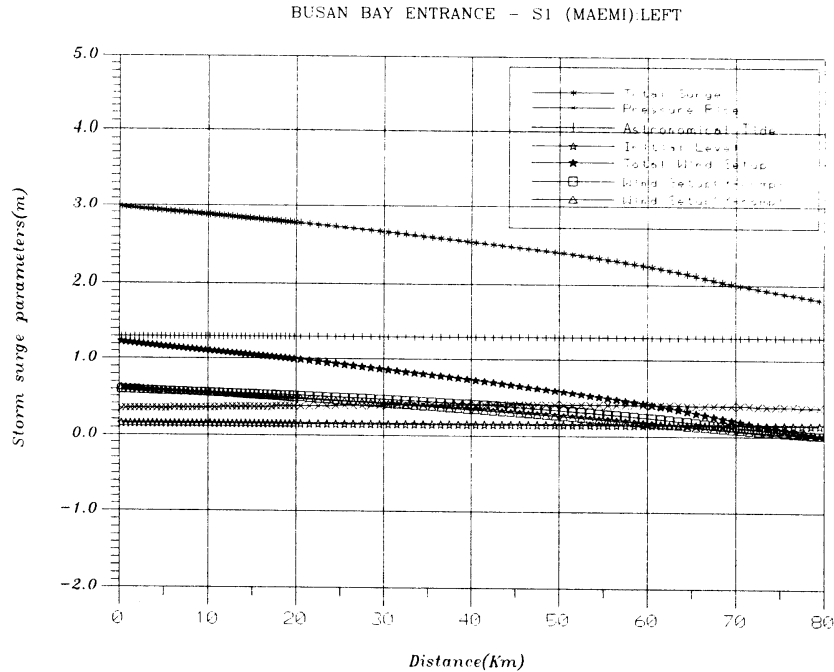


그림16. 대조시 태풍 매미에 대한 계산고조의 공간적분포도

<그림 17>은 수치실험 및 현장조사 결과 해안선을 따라 침수가 발생된 영역에서 대표적인 침수원인 및 수위를 나타낸 것으로 영도 남향입구에서 중리에 이르는 해변에 해당한다. 연안 해역의 해저형상, 만 입구(inlet)의 영향 등 파랑의 변형에 따른 고조의 영향은 다음절에서 검토하기로 한다. 그러나, 연구대상해역 입구에서의 강수 및 하천 유출수 등이 총 수위에 영향을 미칠 것이나, 이 실험에서는 이를 무시하는 것으로 하였다.

표2. 폭풍고조의 수치시뮬레이션 결과

수위상승인자	표준 태풍 (고조, m)	태풍 매미 (고조, m)
바람상승(전체)	-0.1~1.4	-0.2~1.4
해안과직교	-0.1~0.9	-0.1~0.8
해안과평행	-0.2~0.6	-0.2~0.6
천문조	0.1~1.4	0.1~1.4
전조(초기해면)	0.1~0.3	0.1~0.3
기압상승	0.3~0.4	0.3~0.4
총수위상승량	0.3~3.2	0.3~3.3

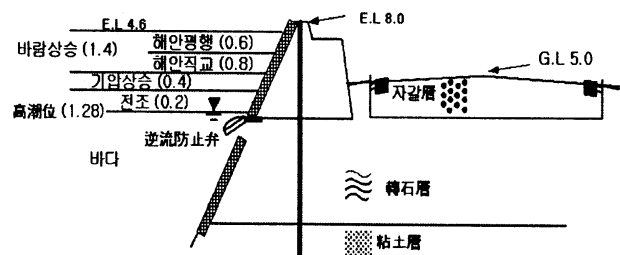


그림17. 영도해안을 따라 폭풍고조로 인한 침수 분석

2) 극한파랑의 계산

본 절에서는 확장 완경사방정식에 기초한 파랑모델을 다대포에서 동백섬에 이르는 영도를 포함한 부산항 해역에 태풍 매미가 도래시 외해측에 극한파랑의 조건을 적용하여 해안선 인근해역에서의 파랑변화를 알아보고자 한다. 모델은 복합요소법(HEM)을 통해 삼각요소로 대

상역을 구성하고 쇄파조건 및 비선형 조건의 상태에서 시뮬레이션을 수행하였다. 수치모델 실험을 위한 수심자료는 이 해역에 대한 해양조사원 간행 수치해도(Chart No. 201, No. 202)를 이용하여 입력하였으며, 북항측 해군부두의 경계조건을 반영하였다.

<표 3>은 수치모델실험을 위한 입사파의 조건 및 유한요소 모델의 요소망, 격자수, 수치모델 계산시간을 각각 나타낸 것이다. 2003년 태풍 매미 내습시의 극한파랑으로 현장계측치 및 모델링에 의한 계산치를 분석하여 파고 13m, 주기 13.8초를 적용하였다. 극한파랑 계산을 위한 유한요소 격자망의 광역구성도 및 세부구간의 상세는 <그림 18> 및 <그림 19>와 같다.

<그림 20> 및 <그림 21>은 극한파랑의 계산결과를 정리한 것으로 태종대에서 중리영역을 1구간, 중리에서 남항의 대교동을 2구간, 북내외항역을 3구간, 조도에서 태종대를 4구간으로 하여 정리된 극한파랑은 2구간의 중간에서 남항방파제에서 최대 파고인 5.3m를 나타내었으며, 1구간의 동삼동 감지해변에서도 5m 이상으로 나타났다. 북항내에서는 일부 구간을 제외하고는 1m 이하로 비교적 낮은 파고가 형성되는 것으로 계산되었다. <그림 22>는 각 세부구간에서 해안선을 따라 극한 파랑의 계산 결과를 비교한 것이다. 이상의 결과에서 극한파랑은 주로 1,2,4구간의 개방역에서 크게 나타났으며, 3구간의 북내항 및 외항에서는 방파제 및 영도 및 조도로부터 바람과 파랑이 차단되어 비교적 낮은 반응을 나타내었다.

표3. 극한파랑 입력 조건 및 수치모델 구성

Wave Direction	Wave Height	Wave Period	Remark	Number of Nodes	Number of Elements	Calculation Time (P4 2.6Gh 512Mb)
S	13.0m	13.8 sec	Typhoon 'MAEMI(2003)' induced Significant Wave	54,920	106,582	50 Min.

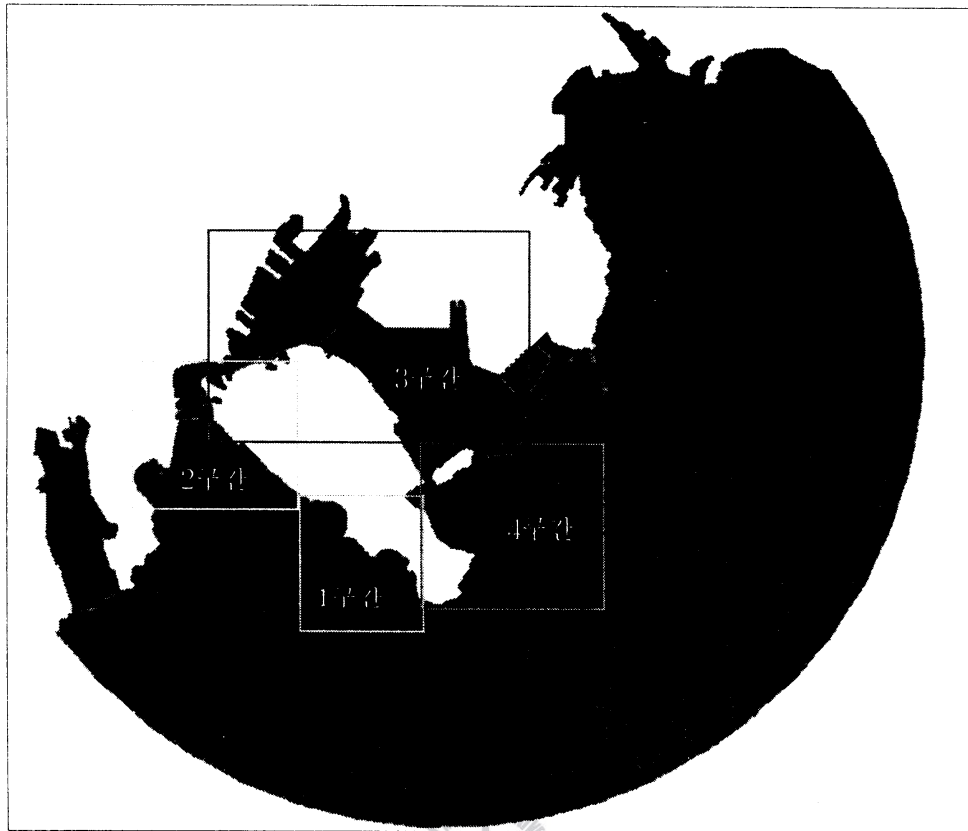


그림18. 부산항의 광역 유한요소 망

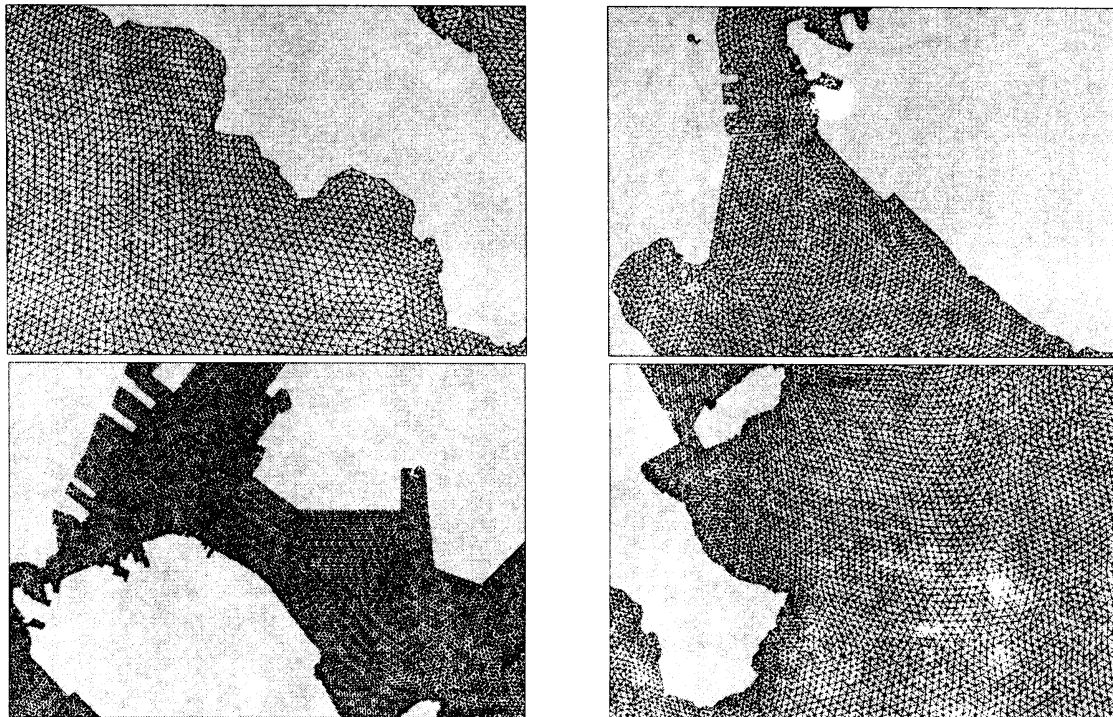


그림19. 영도 부근역 세부 유한요소 망

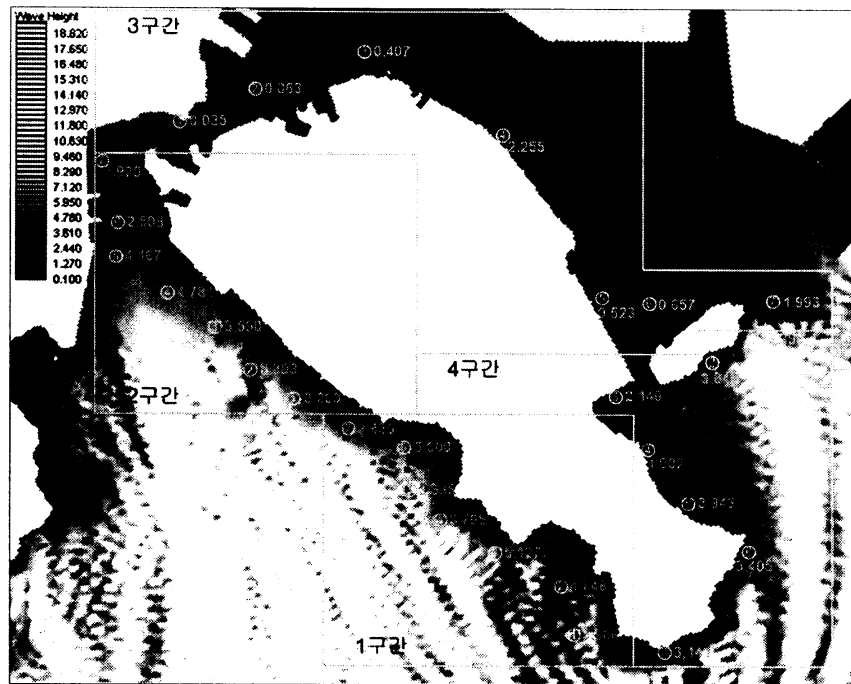


그림20. 부산 영도해안선 주위에서의 구간별 극한파랑의 계산



(a) 1구간



(b) 2구간



(c) 3구간



(d) 4구간

그림21. 부산 영도 주위 세부 구간별 극한파랑의 계산 결과

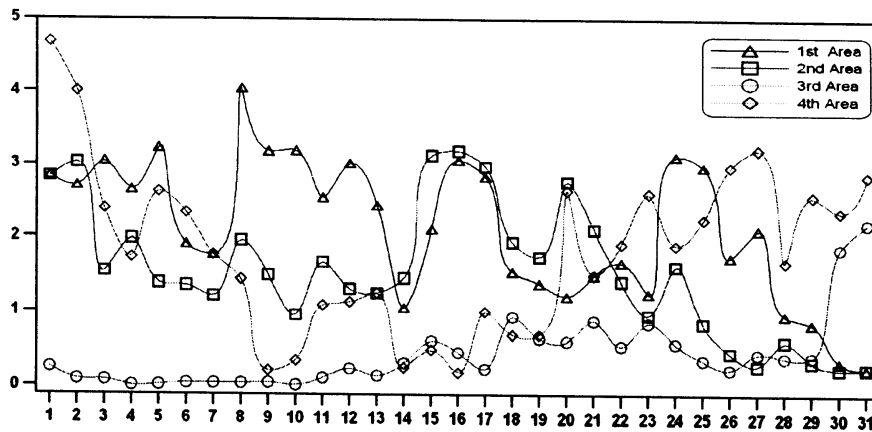


그림22. 영도해안선을 따라 극한 파랑의 비교

2. 침수원인 및 재해위험도

이상의 결과와 현장조사를 통해 영도 해안역에서 발생한 침수대상역을 분석하고 계산에 의한 해수면의 높이를 영도저지대의 표고 자료를 활용하여 태풍시 발생할 수 있는 침수피해지역을 등급별로 영역을 설정하여 경고지역, 위험지역, 대피지역 등 재해지도를 작성해 보았다. 대피지역은 직접적으로 폭풍고조와 극한파랑의 영향으로 침수가 발생할 것으로 예상되어 대피를 안내해야 할 지역이고, 위험지역은 이와 직접적으로 침수는 되지 않으나 집중강우 및 국지강풍이 발생할 때 또는 배수로가 차단될 때 침수 위험이 나타나는 지역이며, 경고지역은 위험지역과 인접된 지반고 15m 이하의 지역을 지칭한다. 계산과 표고분석에 따른 영도의 재해지도 작성 결과는 <그림 23>과 같다.

전반적으로 볼 때 침수의 원인은 두가지로 대별하여 대상역의 자연지형적 특성과 대규모 호안 변경공사의 인공적인 인자가 결합된 것으로 분석되었다. 즉, 자연적 여건으로는, i) 남의 항역이 개방해역이면서도 남향방파제에 이르는 구간이 송도 및 태종대로 형성된 삼각형의 만으로 태풍시 지속적으로 강한 바람에너지를 해수면에 수평방향으로 공급하여 wind setup현상으로 인한 해수의 집적과 대조기 만조시가 어우러졌으며, ii) 해안선과 직각방향으로 태풍 상륙시 고조의 영향이 3.3m 상승하였고, iii) 특히, 태풍 매미는 발생빈도 100년 주기 이상의 거대 태풍으로 기록되어 사라호 보다 큰 수준이었다. 따라서 호안이 없는 해안지대는 침수 및 강한 파력으로 인한 피해를 피할 수 없었다. 또한, 작지만, 위치적인 특성으로 온난화로 수위 상승과 조차가 과거보다 증가한 것도 일조한 것으로 판단된다. 한편, 인위적인 요인으로는 i) 영도측 남향방파제 부근 호안역에서 대교건설시 호안의 소파를 위한 TTP를 제거하여 쉽게 월파를 허용함과 아울러 모래, 자갈 등의 골재가 배수로를 메워버려 월파된 해수 및 우수가 쉽게 배출되지 못하게 한 원인도 일부 가세된 것으로 나타나 연안역 공사시 폭풍도래시 대비 및 방재를 위한 노력이 얼마나 중요한가를 알려주는 중요한 계기가 되었다.

장래의 재해에 대비하기 위한 대책으로는 저지대 구 시가지들 주민의 이주나 도시 재정비가 필연적이거나 현재의 시가지 형성특성을 볼 때 추진 가능성은 희박하다. 따라서, i) 우수관,

오수관의 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 대조시 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 수해대책 수립(수문설치, 유로확보), v) 항만계획수립시 Zone계획 반영하여 거주지 및 상업지 연계 대상을 정리하여야 할 것이다.

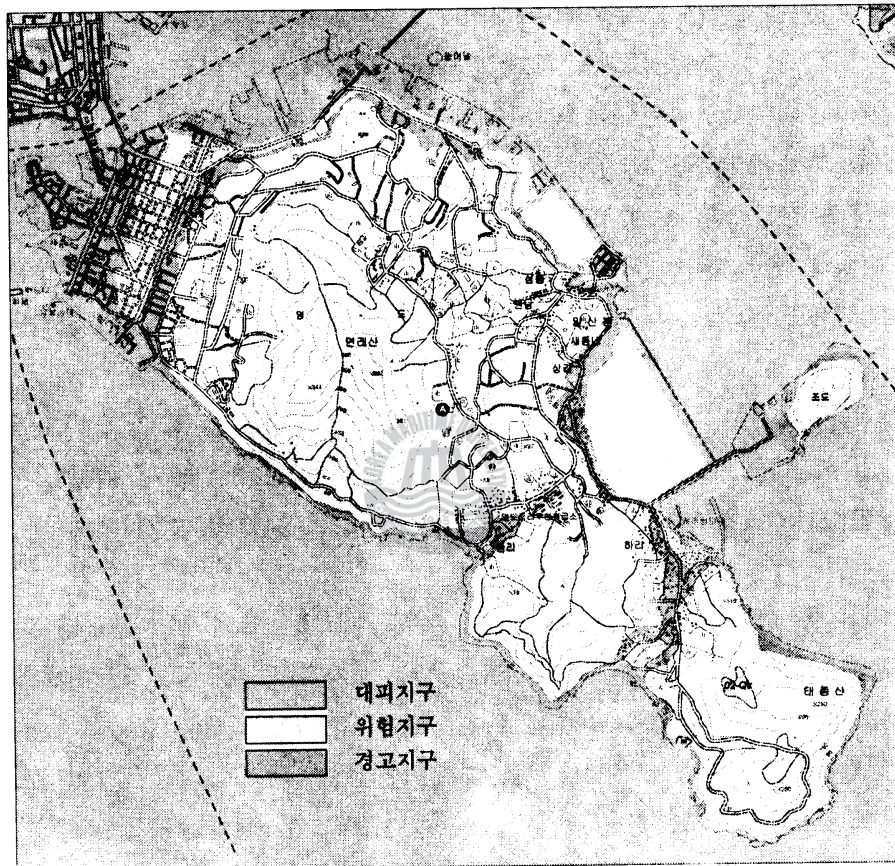


그림 23. 폭풍고조 및 극한파랑의 계산에 의한 영도의 재해지도

V. 요약 및 결론

태풍이 해안으로 이동할 때 기상 및 해양의 특성과 천문조의 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 예측 및 극한 파랑의 변환을 수치모델을 통해서만 기초적으로 다루어 보았다. 광역권 계산치로부터 부산 영도 남항 연안해역에서 태풍 '매미'의 파라메타를 사용하여 폭풍고조를 추산하여, 이론적인 배경을 이해하도록 노력하였으며 극한 파랑에 의한 영향까지를 모델로 접근하는 시도를 하였다.

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

- i) 조석관측기록으로 부터 과거의 태풍과 관계된 초기해면상승치를 찾아낼 표준이 없으며, 더구나 초기해면상승은 태풍과 독립적으로 발생한다.
- ii) 폭풍고조의 계산에서 해저마찰은 수심과 외해의 저면지형상태의 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.

- iv) 특히 본 연구를 통해 기초적이지만 고조 및 극한 파랑으로 인한 연안해역에서 침수가 예상되는 지역을 침수정도에 따라 경고지역, 위험지역, 대피지역으로 구분하여 재해지도를 작성하여 방재계획에 반영할 수 있는 근거를 마련하였다.

요 약

최근 초대형 태풍의 내습으로 한국 연안해역에 치명적인 타격을 가져왔고 이로 인해 연안구조물의 설계기준을 재고해야 한다는 논의가 되고 있다. 극한파랑을 입력으로 한 파랑변환의 계산은 특히 해안역의 계획 및 건설 작업 분야에서 의미가 있다. 본 연구에서 태풍으로 인한 수위의 변화예측은 물리모델에서나 실제현장에서 다루기가 매우 어렵기 때문에 수치모델에 주로 근거를 두었다. 복잡한 해안선 및 구조물 해역에 대한 파랑변환 수치모델을 다루고 극한파랑의 입력을 위해 광역에서의 태풍매미의 도래시 관측과 수치모델의 분석에서 도입하였다. 최종적으로 한국 남해안의 부산항에서 폭풍고조 및 극한파랑의 문제에 위에서 기술한 모델을 적용하여 수위상승의 효과와 극한파랑의 변환을 해안역 침수와 관련하여 분석하였다. 아울러 관심대상역에서 기초적인 재해위험지도를 제시해 보았다.

ABSTRACT

Recently huge typhoons had attacked to the coastal waters in Korea and caused disastrous casualties in those area. There are some discussions on correction to the design parameters for the coastal structures. Wave transformation computations with the extreme waves 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. Wave prediction with a two dimensional numerical model for a site with complicated coastal lines and structures at the period of typhoon 'Maemi' is discussed. In order to input parameters for the extreme wave conditions, we analyzed the observed and predicted typhoon data. Finally we applied the model discussed above to the storm surge and extreme wave problem at Busan Harbor, the southeast coast of Korea. Effects of water level variation and transformation of the extreme waves in relation with the flooding in coastal waters interested are analyzed. We then made an attempt to present a basic hazard map for the corresponding site.

참고문헌

1. 김지연, 이중우, 이학승, 양상용(2003), “영일만 신항건설에 따른 항만정온도의 변화”, *한국항해항만학회지* 28권 5호, pp. 421-428.
2. 신승호, 홍기용, 최학선, N. Hashimoto(2004), “제3세대 파랑추산모형을 이용한 태풍매미의 극한파랑 재현 (I) -WAM 모형의 파향격자 분할법 및 파 발달 제한조건의 수정-”, *한국항해항만학회지* 28권 6호, pp. 557-564.
3. 신승호, 홍기용(2004), “제3세대 파랑추산모형을 이용한 태풍매미의 극한파랑 재현 (I) - 태풍 '매미'가 야기한 우리나라 남해안 일대의 극한파랑 특성-”, *한국항해항만학회지* 28권 8호, pp. 557-564.
4. 이중우(1989), 태풍파를 기준으로한 전설계수심의 산정에 관한 연구”, *한국항해학회지* 제13권, 제3호, pp.45~65.
5. 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.
6. 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.
7. Dalrymple, R. A., Kirby, J. T., and Hwang, P. A.(1984), Wave Diffraction due to areas of high energy dissipation, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 110, 67-79.
8. Freeman, J. C. Jr., Baer, L., and C. H. Jung(1957), “The Bathystrophic Storm Tide”, *Journal of Marine Research*, Volume 16, No. 1.

