

# ADCIRC와 GIS를 이용한 태풍해일의 최대범람구역 산정

안창환\*·최 현\*·윤홍주\*\*

\*경남대학교 공과대학 토목공학과\*\*부경대학교 환경해양대학 위성정보과학과

## The greatest overflow area calculation of a Typhoon model using ADCIRC and GIS

Chang-whan Ahn\*·Hyun Choi\*·Hong-Joo Yoon\*\*

Kyungnam University\*·Pukyong National University\*\*

E-mail : survey21c@nate.com·hchoi@kyungnam.ac.kr·yoonhj@pkn.ac.kr

### 요 약

본 연구에서는 태풍 “매미” 당시 해일로 인해 가장 큰 피해를 입었던 마산만 지역을 중심으로 태풍 모형을 재현하여 이때 발생하는 최고극조위를 계산한 후 실제 최고극조위와의 비교분석을 실시하고 또한 최고극조위에 따른 최대범람구역을 산정하여 실제 범람구역과 비교분석함으로써 태풍모형의 정확도를 분석하여 향후 태풍모형에 따른 조위 변화등을 예측함으로써 안정적인 항만구조물설계가 이루어 질 수 있도록 필요한 기초 자료를 제공하는데 연구목적이 있다.

### ABSTRACT

In this research, a typhoon model has been reproduced on the Masan area which had a great damage caused by a tidal wave of the typhoon "MAEMI" at that time. In addition, after calculating the highest level of a tide that happens in the case, it can be compared with one in a real situation, and the accuracy of the typhoon model could be analyzed as well by comparing the actual overflow area with the greatest overflow area computed by the data of the highest level of a tide. This research is to provide some fundamental and primary materials for the design of stable harbor structure by predicting such as tidal changes that follow some typhoon matrixes hereafter.

### 키워드

ADCIRC, GIS, 태풍해일, 조위

### I. 서 론

우리나라는 매년 태풍이나 온대성 저기압의 영향으로 높은 파랑과 해일이 발생하여 각종 항구, 항만 구조물, 연안시설 및 선박들에 피해를 유발하고 있다. 최근 5~6년 사이에도 2001년 태풍 내습이 없던 해를 제외하고 우리나라에 상륙한 태풍은 호우피해, 강풍피해와 더불어 대규모의 해일을 동반하였다. 태풍해일은 만조위와 겹쳐 발생할 경우 비정상적인 최고극조위에 이르게 되며 또한 순간적인 내습으로 예측이 어려운 면이 있어 막대한 피해가 발생한다. 특히 2003년 9월에 발생한 태풍 “매미”의 경우 태풍해일이 만조위와 겹쳐 발생함으로써 경남일대의 피해는 사망 70여명, 부상 300여명, 이재민 45,000여명에 이르고, 제

산피해 역시 2조 8천억원에 이르는 등 태풍해일 사상 최대규모의 해일 피해를 발생시킨 바 있다.[1]

본 연구에서는 태풍 “매미” 당시 해일로 인해 가장 큰 피해를 입었던 마산만 지역을 중심으로 태풍모형을 재현하였다. 그리고 최고극조위에 따른 최대범람구역을 산정하여 향후 태풍모형에 따른 조위 변화등을 예측하여 실제 범람지역과 비교분석을 실시하였다.

### II. 본 론

본 실험에서 사용된 ADCIRC는 정밀한 경계 처리를 하며 장기간 동안 넓은 영역에서 해수순환을 모의할 수 있도록 개발된 유한 요소 모형으로, 수심

적분된 2차원 모형 (2DDI)과 3차원 모형(3DVS)으로 구성되어 있으며 연안, 대륙붕, 강어귀 등의 해수면 변화를 예측할 수 있다. 근간에는 넓은 영역을 처리하는데 있어 계산효율을 증진시키기 위해 병렬계산을 실시하여 이용되어지고 있다.[2]

2차원 모형에서 수위는 수심 적분된 연속 방정식으로 부터 구하고, 유속은 수심 적분된 운동방정식으로부터 구하며 그 기본 방정식은 다음과 같다.

▶ 2DDI 직교 좌표계 지배방정식

2DDI ADCIRC는 2차원 수심 적분된 천해방정식을 풀며 기본 연속방정식은 다음 ①과 같으며 비보존성의 기본 운동방정식은 아래 ②, ③과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots ①$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + D_x - B_x \dots\dots\dots ②$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma_0) \right] + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + D_x - B_x \dots\dots\dots ③$$

여기서,

( $\eta + \gamma$ ): 기조력, 지구조석, 자기인력, 하중조석  
 $\tau_{sx}, \tau_{sy}$ : 수면의 응력,  $B_x, B_y$ : 2DDI 경압가속항  
 $f \equiv 2\Omega \sin\phi$ : Coriolis 인자,  $\tau_{bx}, \tau_{by}$ : 바닥의 응력,  
 $D_x, D_y$ : 2DDI 운동량확산항

$H(x, y, t \text{ or } \lambda, \phi, t) \equiv h + \zeta$ : 지오이드에 따른 수심  
 $U, V$ : 수심평균된 수평방향 유속

위의 방정식을 계산할 때 잘 알려진 바와 같이 유한 요소법을 사용하여 Galerkin 생기는 수치해석적 오류를 피하기 위해 연속방정식은 일반 파랑연속방정식(GWCE)으로 대체되며 공간적 변수의 수치해석 가중치인  $Y_0$ 를 추가하고 연쇄법칙을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} - UH \frac{\partial \tau_0}{\partial x} - VH \frac{\partial \tau_0}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots ④$$

여기서,

$$A_x \equiv \frac{\partial UH}{\partial t} + \tau_0 UH = \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \tau_0 Q_x$$

$$A_y \equiv \frac{\partial VH}{\partial t} + \tau_0 VH = \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \tau_0 Q_y \dots\dots\dots ⑤$$

$A_x, A_y$ 으로 표현되는 시간 미분항의 연쇄법칙과  $\partial U/\partial t, \partial V/\partial t$ 을 대신하는 운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\left\{ \begin{aligned} A_x &= U \frac{\partial H}{\partial t} + H \left[ -U \frac{\partial U}{\partial x} - V \frac{\partial U}{\partial y} + fV - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + D_x - B_x + \tau_0 U \right] \\ A_y &= V \frac{\partial H}{\partial t} + H \left[ -U \frac{\partial V}{\partial x} - V \frac{\partial V}{\partial y} + fU - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} + D_y - B_y + \tau_0 V \right] \end{aligned} \right\}$$

..... ⑥

최종 형태의 GWCE로서 위의  $A_x, A_y$ 가 ④에 대입되고, ADCIRC는 GWCE와 함께 비보존 운동방정식 ②, ③을 계산한다.

▶ 2DDI 구면 좌표계 지배방정식

직교 좌표계와 마찬가지로 2차원 수심 적분된 천해방정식을 풀며 수평격자의 경도와 위도는 ( $\lambda, \phi$ )으로 표시된다.

기본 연속방정식과 비보존 운동방정식은

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial UH}{\partial \lambda} + \frac{1}{R} \frac{\partial VH}{\partial \phi} - \frac{VH \tan \phi}{R} = 0 \dots\dots\dots ⑦$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial U}{\partial \phi} - \left( \frac{U \tan \phi}{R} + f \right) V = - \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{s\lambda}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{b\lambda}}{\rho H} + D_\lambda - B_\lambda \dots\dots\dots ⑧$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial V}{\partial \phi} + \left( \frac{U \tan \phi}{R} + f \right) U = - \frac{1}{R \sin \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{s\phi}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{b\phi}}{\rho H} + D_\phi - B_\phi \dots\dots\dots ⑨$$

여기서, R : 지구반지름

구면 좌표계는 Carte Parallelo-Grammatique Projection (CPP)을 이용하여 x, y로 변환되며  $\lambda, \phi$ 를 중심으로 하는 Cylindrical Map Projection에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$x = R(\lambda - \lambda_0) \cos \phi_0, y = R\phi \dots\dots\dots ⑩$$

CPP좌표에 있어서 연속방정식과 운동방정식은

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + S \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} - \frac{VH \tan \phi}{R} = 0 \dots\dots\dots ⑪$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + SU \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - \left( \frac{U \tan \phi}{R} + f \right) V = - S \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + D_x - B_x \dots\dots\dots ⑫$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + SU \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - \left( \frac{U \tan \phi}{R} + f \right) U = - \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} + D_y - B_y \dots\dots\dots ⑬$$

여기서 x항에 가중되는 인자인  $S \equiv \cos \phi / \cos \phi$ 와 추가항인  $\tan \phi / R$ 를 제외하면 위의 식은 직교 좌표계 방정식인 ①~②와 일치하며 운동방정식에서  $U \tan \phi / R$ 은 Coriolis인자로 처리할 수 있다. 직교 좌표계와 마찬가지로 Galerkin 유한 요소법을 사용하는데 있어 오류를 피하기 위해 기본 연

속방정식은 GWCE로 대체하고 가중치를 둔다.

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} + S \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} - \dots \quad (14)$$

$$UHS \frac{\partial \tau_0}{\partial x} - VH \frac{\partial \tau_0}{\partial y} - \frac{A_y \tan \phi}{R} = 0$$

이를 다시 연쇄법칙과 운동방정식을 이용하여 표현하면

$$A_x = U \frac{\partial H}{\partial t} + H \left\{ \begin{aligned} & -US \frac{\partial U}{\partial x} - V \frac{\partial U}{\partial y} + fV - S \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{P_x}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] \\ & + \frac{\tau_{xz}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{yz}}{\rho_0 H} + D_x - B_x + \tau_0 U \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$A_y = V \frac{\partial H}{\partial t} + H \left\{ \begin{aligned} & -US \frac{\partial V}{\partial x} - V \frac{\partial V}{\partial y} + fU - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{P_x}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] \\ & + \frac{\tau_{xy}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{yz}}{\rho_0 H} + D_y - B_y + \tau_0 V \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

여기서  $A_x, A_y$ 는 GWCE에 대입되어 비보존성 운동량 방정식 (12), (13)과 함께 계산되어진다.

본 실험에서는 ADCIRC의 기상 데이터 조건 타입인 NWS를 5로 설정하고 대상영역 전체 절점의 기상 데이터인 대기압, 풍속  $W(x)$ ,  $W(y)$ 를 구하여 기상 데이터 입력 파일인 fort.22를 생성하였다.

$$WIND\ SPEED = magnitude\ of\ WIND\ VEL \dots \quad (17)$$

$$DRAG\ COEFF = 0.001 \times \frac{1}{(0.75 + 0.067 \times WIND\ SPEED)} \dots \quad (18)$$

$$if(DRAG\ COEFF.gt.0.003)DRAG\ COEFF=0.003 \dots \quad (19)$$

$$WIND\ STRESS = DRAG\ COEFF \times 0.001293 \times \epsilon D\ VEL \times WIND\ SPEED \quad (20)$$

TIME(UTC)	N(°)	E(°)	P(hPa)	Wind(kt)
2003091209	33.9	127.5	945	80
2003091212	34.9	128.3	955	75
2003091218	37.0	129.8	970	60
2003091300	39.1	131.8	975	55
2003091306	40.5	134.6	980	50
2003091309	41.5	136.9	980	50
2003091312	42.3	138.1	980	50
2003091315	43.2	140.0	980	50
2003091318	44.7	141.2	980	50

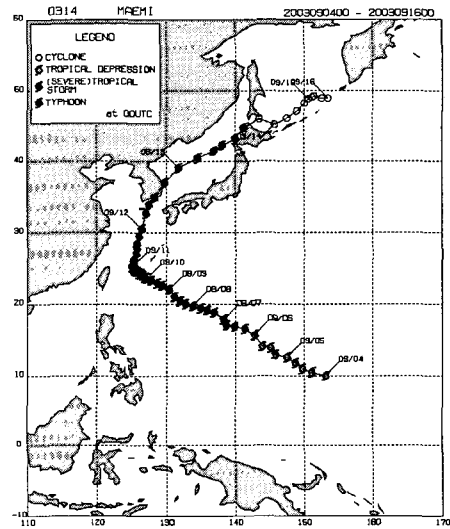


그림 1. 태풍“매미” 이동경로

### III. 수치실험

본 수치실험에서는 2003년 9월 마산항을 거쳐 간 태풍 “매미”의 폭풍해일로 인한 이상적인 조위 상승을 산정하여 실제 관측치와 비교분석하고 1:1000 수치지도를 이용하여 조위상승에 따른 최대범람구역을 산정하고자 한다.

태풍의 경로는 다음 표와 같으며 수치실험에서 사용한 태풍의 기상자료는 태풍연구센터 ([www.typhoon.or.kr](http://www.typhoon.or.kr))에서 관측되어진 데이터를 이용하였다.

표 1. 태풍“매미” 이동경로

TIME(UTC)	N(°)	E(°)	P(hPa)	Wind(kt)
2003091200	30.5	126.5	930	95
2003091206	32.7	127.1	935	90

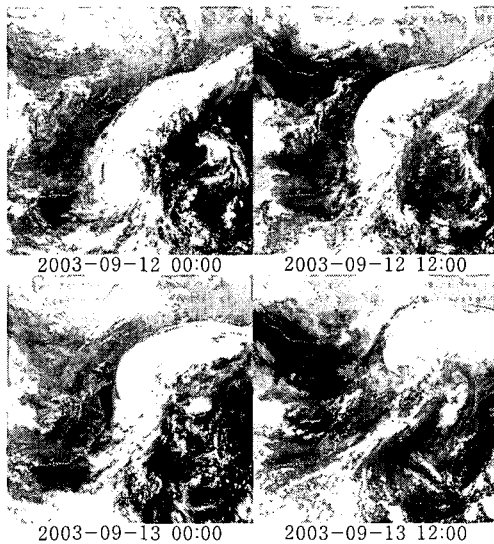


그림 2. 태풍“매미”위성영상

IV. 실험결과

아래 그림은 ADCIRC 모형을 이용하여 태풍 "매미"를 시뮬레이션한 후 얻은 기압분포, 수심분포, 풍향을 도해적으로 표현하였다.

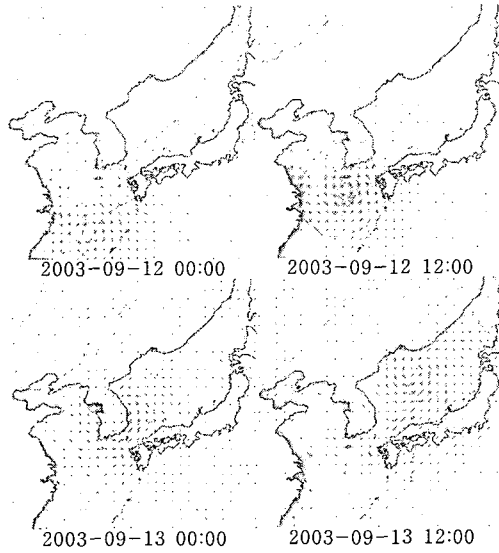


그림 3. 태풍 "매미" 수치실험모형

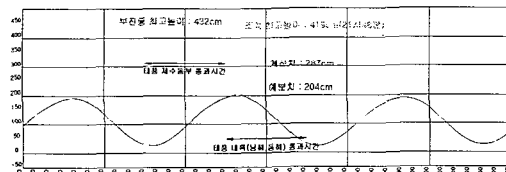


그림 4. 수치모형을 이용한 조위해석결과 비교

조석별 최대범람구역을 산정하기 위하여 마산지역의 1:1,000 수치지도를 이용하여 DEM을 구성한후 이를 이용하여 조위별 최대범람구역을 산정한 후 실제 관측치와 비교분석하였다.

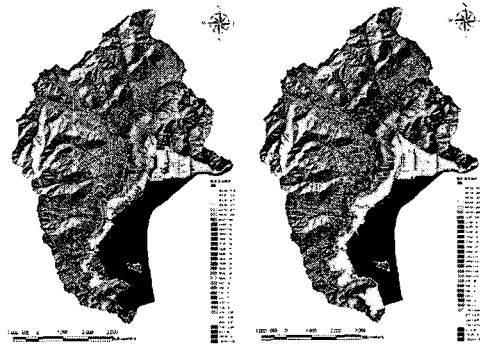
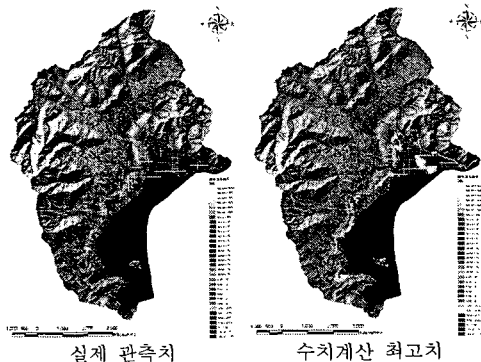


그림 5. 조석별 최대범람구역 비교

V. 결 론

본 논문에서 수행한 수치실험 결과치와 검조소에서 관측된 부진동을 제외한 해일고는 132cm의 고조위 편차가 발생하였고, 기상청의 예보치와는 215cm의 고조위 편차가 발생하였다.

고조위 편차가 크게 발생하는 원인으로는 마산항의 지형적 위치가 태풍의 진행방향의 오른쪽에 놓여 있어 태풍의 영향을 크게 받았고, 긴 폐쇄성만의 형태를 지남에 따라 바람에 의한 해수면 상승 및 부진동의 영향으로 급격한 수위상승을 일으킨 것으로 추정된다. 실제 태풍 "매미"는 기압하강으로 약 0.5m의 수위상승효과를 일으켰고, 강풍에 의한 해수퇴적작용에 의해 약 1m의 수위상승이 발생하였으며, 천문조와 기상조에 의한 수위상승효과가 증첩되어 더 큰 태풍해일이 발생한 것으로 판단된다.

향후 태풍해일 위험지역의 지형적 특성을 고려한 정확한 분석데이터를 위하여 고해상도 위성영상 및 LiDAR등의 데이터를 활용할 필요성이 있으며, 이를 이용하여 범람위험구역의 자료를 GIS Data Base화 하여 보다 정확한 피해합수를 도출하여 피해를 최소화 할 수 있는 방안을 마련해야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 이재준, 태풍 「매미」 내습시 경남해역의 조석 및 폭풍해일 모의, 국립방재연구소, p6, 2004
- [2] Wheeler M F, Progress Report: Parallelization of ADCIRC3D, CEWES MSRC 98-11