

---

# MD-FDA와 GIS를 이용한 마산만의 태풍해일 범람구역 경제성 분석

최 현\* · 안창환\*

Economic Analysis of Typhoon Surge Floodplain that Using GIS and MD-FDA from Masan Bay, South Korea

Choi, Hyun\* · Ahn, Chang-Hwan\*

---

이 논문은 2008년도 경남대학교 학술장려금을 지원받았음

---

## 요 약

2003년 9월 12일 마산시 해안지역에 상륙한 태풍 ‘매미’는 지금까지 우리나라에서 발생한 가장 큰 연안재해를 기록하였다. 따라서 태풍해일에 대한 종합적인 방재시스템 구축과 해일피해를 대비한 세부구역별 대책수립이 시급한 실정이다. 본 연구에서는 태풍 ‘매미’ 당시 해일로 인해 가장 큰 피해를 입었던 마산만 지역을 중심으로 최고 극조위에 따른 최대침수구역을 산정하고 실제 침수구역과 비교분석하여 침수모형의 정확도를 분석하고 침수해일의 방어목적으로 제안한 방재언덕등에 대한 다차원 홍수피해 산정방법을 적용하여 경제성 분석을 실시함으로써 이에 대한 타당성 평가 및 방재사업에 필요한 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다. 또한 향후 태풍해일 위험지역의 지형적 특성을 고려한 정확한 분석데이터를 위하여 고해상도 위성영상 및 LiDAR 등의 데이터를 활용할 필요성이 있으며, 이를 이용하여 범람위험구역의 자료를 GIS Database화하여 보다 정확한 피해함수를 도출하여 피해를 최소화 할 수 있는 방안을 마련해야 할 것이다.

## ABSTRACT

In the case of ‘MAEMI’, the Typhoon which formed in September, 2003, the largest-scale damage of tidal wave was caused by the co-occurrence of Typhoon surge and full tide. Until now Korea has been focusing on the calculating the amount of damage and its restoration to cope with these sea and harbor disasters. It is essential to establish some systematic counterplans to diminish such damages of large-scale tidal invasion on coastal lowlands considering the recent weather conditions of growing scale of typhoons. Therefore, the purpose of this research is to make the counterplans for prevention against disasters fulfilled effectively based on the data conducted by comparing and analyzing the accuracy between observation values and the results of estimating the greatest overflow area according to abnormal tidal levels centered on Masan area where there was the severest damage from tidal wave at that time. It's necessary utilize data like high-resolution satellite image and LiDAR(etc.) for correct analysis data considering geographical characteristics of dangerous area from the storm surge. And we must make a solution to minimize the damage by making data of dangerous section of flood into GIS Database using those data (as stated above) and drawing correcter damage function.

## 키워드

ADCIRC, GIS, Typhoon Surge, MD-FDA

## I. 서론

최근 한반도의 기상상태는 지구온난화에 따른 해수 온도상승과 아열대성 기후의 징후를 보이고 있어 내습하는 태풍의 강도가 더 강해지고 있는 추세이며, 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.

태풍해일의 특성상 만조위와 겹쳐 발생할 경우 비정상적인 최고극조위에 이르게 되며 또한 순간적인 내습으로 예측이 어려워 막대한 피해가 발생하였는데, 특히 2003년 9월 12일 마산시 해안지역에 상륙한 태풍 ‘매미’로 인한 경남일대의 피해는 사망 70여명, 부상 300여명, 이재민 45,000여명에 이르고, 재산피해 역시 2조 8천억 원에 달하였다[1]. 따라서 태풍해일에 대한 종합적인 방재시스템 구축과 해일피해를 대비한 세부구역별 대책 수립이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 태풍 ‘매미’당시 해일로 인해 가장 큰 피해를 입었던 마산만 지역을 중심으로 최대범람구역을 산정한 후 실제침수지역과 비교분석하여 그 정확도를 분석하였다. 그리고 경제성 분석을 위하여 「치수사업 경제성분석 개선방안 연구(2001)」의 방법을 보완한 「치수사업 경제성분석 방법 연구-다차원 홍수피해 산정방법-; MD-FDA(2004)」를 적용하여 보다 정량적인 홍수피해액 산정 및 경제성 분석을 실시하였다.

## II. 본론

### 2.1. ADCIRC

ADCIRC(ADvanced CIRCulation model for oceanic, coastal and estuarine water) 모델은 정밀한 경계 처리를 하며 장기간 동안 넓은 영역에서 해수순환을 모의할 수 있도록 개발된 유한 요소 모형으로 연안, 대륙붕, 갯벌 등의 해수면 변화를 예측할 수 있다.

ADCIRC는 수심 적분된 2차원 모형(2DDI)과 3차원 모형(3DVS)으로 구성되어 있으며 2DDI는 해저마찰계수와 운동량 확산계수를 이용하는 수심적분된 외부모드 방정식(external mode equation)만 풀게 되어있고, 3DL

은 모드분리(mode splitting) 기법을 이용하여 2DDI에서 처럼 외부모드(external mode)에서 자유수면에 대해서 수심적분된 연속방정식과 운동방정식을 풀고 내부모드(internal mode)에서 상대적으로 긴 time step 동안 3차원 방정식을 풀어 수직성분을 계산한다. 근간에는 넓은 영역을 처리하는데 있어 계산효율을 증진시키기 위해 병렬화를 구성하여 성공적으로 이용되어지고 있다[2].

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

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

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

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = - \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} + D_y - B_y \quad (3)$$

여기서,  $(\eta + \gamma)$ : 기조력, 지구조석, 자기인력

$\tau_{sx}, \tau_{sy}$ : 수면응력

$B_x, B_y$ : 2DDI 경압가속항

$f \equiv 2\Omega \sin \phi$ : Coriolis 인자

$\tau_{bx}, \tau_{by}$ : 바닥응력

$D_x, D_y$ : 2DDI 운동확산항

$H(x, y, t \text{ or } \lambda, \phi, t) \equiv h + \zeta$ :

지오이드에 따른 수심

$U, V$ : 수심평균된 수평방향 유속

위의 방정식을 계산할 때 잘 알려진 바와 같이 유한 요소법을 사용할 때 발생하는 수치적 오차를 피하기 위해 연속방정식은 일반 파랑연속방정식(GWCE; Generalized Wave Continuity Equation)으로 대체되며 공간적 변수의 수치해석 가중치인  $\Upsilon_0$ 를 추가하고 연쇄법칙을 적용하면 다음과 같다.

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

$$A_x \equiv \frac{\partial UH}{\partial t} + \tau_0 UH, A_y \equiv \frac{\partial VH}{\partial t} + \tau_0 VH \quad (5)$$

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

$$\begin{aligned}
 A_x &= U \frac{\partial H}{\partial t} + H \left\{ -U \frac{\partial U}{\partial x} - V \frac{\partial U}{\partial y} + fV - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + D_x - B_x + \tau_0 U \right\} \\
 A_y &= V \frac{\partial H}{\partial t} + H \left\{ -U \frac{\partial V}{\partial x} - V \frac{\partial V}{\partial y} + fU - \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} + D_y - B_y + \tau_0 V \right\}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

최종 형태의 GWCE로서 위의  $A_x, A_y$ 가 (4)에 대입되고, ADCIRC는 GWCE와 함께 비보존 운동 방정식 (2), (3)을 계산한다[3][4].

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.

$$WIND\ SPEED = magnitude\ of\ WIND\ VEL \tag{7}$$

$$DRAG\ COEFF = 0.001 \times (0.75 + 0.067 \times WIND\ SPEED) \tag{8}$$

$$If(DRAG\ COEFF.gt.0.003)DRAG\ COEFF=0.003 \tag{9}$$

$$WIND\ STRESS = DRAG\ COEFF \times 0.001293 \times \in D\ VEL \times WIND\ SPEED \tag{10}$$

### 2.2 MD-FDA

MD-FDA(다차원 홍수피해산정법; Multi-Dimensional Flood Damage Analysis)에서는 침수지역내의 피해자산을 구하여 침수심에 맞는 피해율을 고려하여 직접피해를 산정하는 방법이다. 직접피해액 항목은 크게 ①인명피해액 ②건물피해액 ③건물내용물피해액 ④농경지피해액 ⑤농작물피해액 ⑥사업소 유형·재고자산피해액 ⑦공공시설피해액의 7가지로 분류된다.

침수피해액의 산정은 식 (11)과 식 (12)와 같다.

식 (11)에서 산정한 주거지역, 농업지역, 산업지역에 대한 일반자산 피해액에 인명/이재민 피해액, 공공시설물피해액을 고려하여 식 (12)와 같이 총 피해액을 계산한다. 일반자산 피해액은 침수편입율과 침수피해율을 고려하여 산출하고, 공공시설물 등의 피해액은(일반자

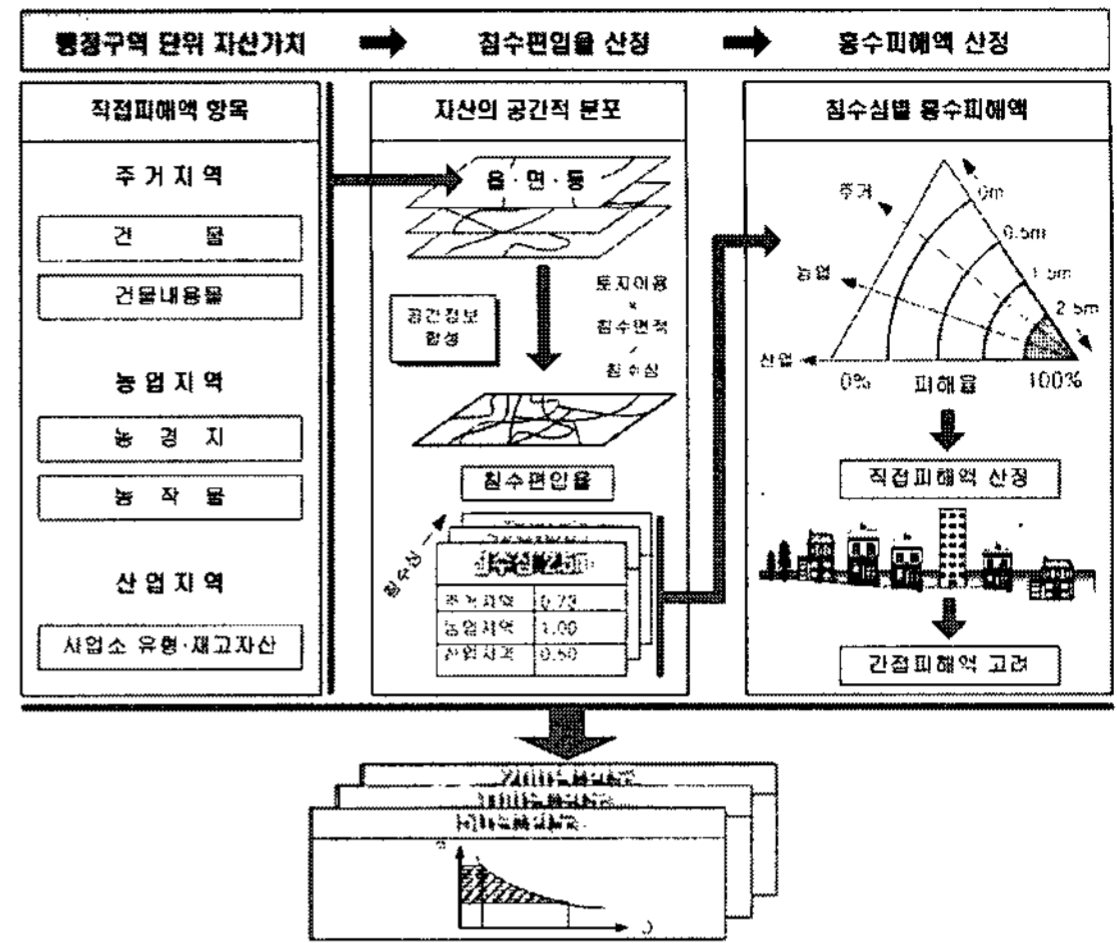


그림 1. 다차원 홍수피해액 산정방법  
Fig. 1. Multi-Dimensional Flood Damage Analysis

산피해액) $\times 1.694$ (일본에서 사용하고 있는 비율)로 산정하며, 인명 피해액은 개선법(건설교통부, 2001)에 제시한 방법을 사용한다.

$$M_i = \sum_{i=1}^n [RD_i + AD_i + ID_i] \tag{11}$$

$$R = (1 + \alpha) M_i + P \tag{12}$$

- 여기서,  $M_i$ : 일반자산피해액
- $RD_j$ : 건물, 건물내용물 피해액 함수
- $AD_j$ : 농경지, 농작물 피해액 함수
- $ID_j$ : 사업체유형, 재고자산 피해액 함수
- $n$ : 해당 읍면동 개수
- $\alpha$ : 공공시설물 피해액의 비율
- $R$ : 직접피해액,  $P$ : 인명피해액

여러 가지 투자계획 중에서 하나를 선택하거나 또는 최적규모로 결정된 시설에 대한 경제성 평가를 위해서는 일반적인 기준이 필요하다. 이러한 기준을 평가기준 (Evaluation Criteria), 평가지표(Evaluation Indicator) 또는 투자기준(Investment Criteria)이라고도 하며, 식 (13)~(15)과 같이 순현재가(NPV; Net Present Value), 편익·비용비(B/C; Benefit-Cost ratio), 내부수익율(IRR; Internal Rate of Return)의 세 가지가 주로 이용되고 있다.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \left[ \frac{NB_t}{(1+r)^t} \right] + \frac{S_n}{(1+r)^n} \tag{13}$$

$$B/C \text{ ratio} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (14)$$

$$IRR = \sum_{t=1}^n \frac{NB_t}{(1+r)^t} = 0 \quad (15)$$

여기서,  $B_t$ : t차년도에 발생하는 편익  
 $C_t$ : t차년도에 발생하는 비용  
 $NB_t$ : t차년도에 발생하는 순편익  
 $n$ : 분석기간,  $r$ : 할인율  
 $S_n$ : 감가상각비를 고려한 잔존가치

다차원 홍수피해산정법은 간략한 절차로 쉽게 피해액을 산정할 수 있는 장점은 있으나 적용항목이 구체화된 만큼 전처리 과정 및 피해액 산정과정에서 다소 복잡해진 단점이 있다[3].

본 연구에서는 이를 보완하기 위하여 그림 2의 과정과 같이 GIS를 활용하여 예상침수구역을 보다 쉽게 산정할 수 있도록 하였으며, 각 피해편익 항목은 통계청의 자료와 연구대상지역의 통계연보, 재해백서등을 활용하여 효율적이고 일괄된 분석이 가능하도록 하였다.

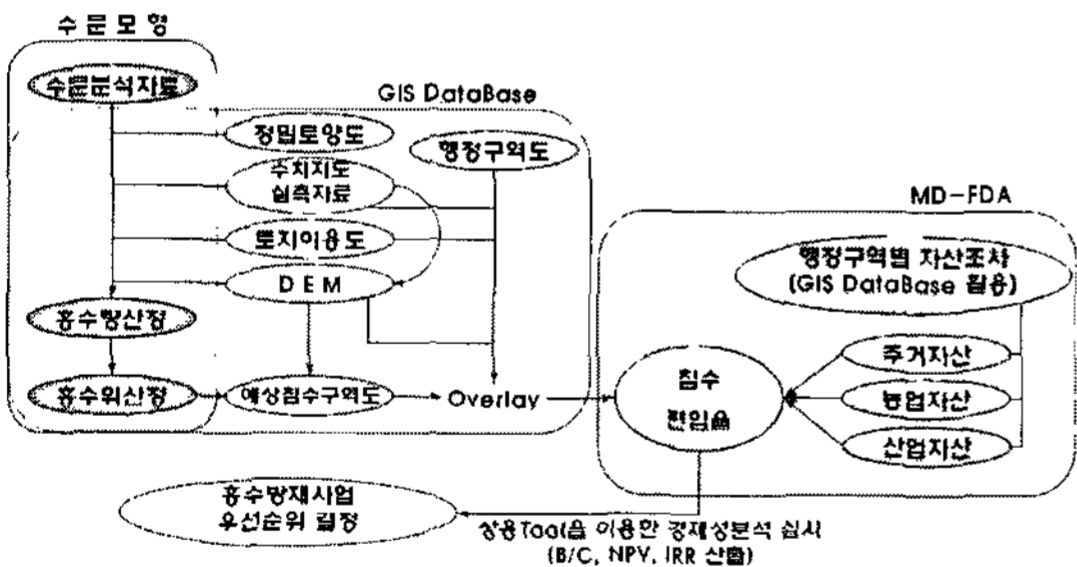


그림 2. MD-FDA와 GIS를 이용한 경제성 분석  
 Fig. 2 Economic analysis used GIS and MD-FDA

### III. 수치실험

본 수치실험에서는 2003년 9월 마산항을 거쳐 간 태풍 '매미'(그림 3)의 폭풍해일로 인한 조위 상승을 산정하여 실제 관측치와 비교분석하고 조위상승에 따른 최대범람구역을 산정하고자 한다.

그림 4와 5는 ADCIRC 모형을 이용하여 태풍 '매미'를 시뮬레이션한 결과를 도해적으로 표현하였으며, 그림 6은 조위분석결과를 비교분석한 것이다.

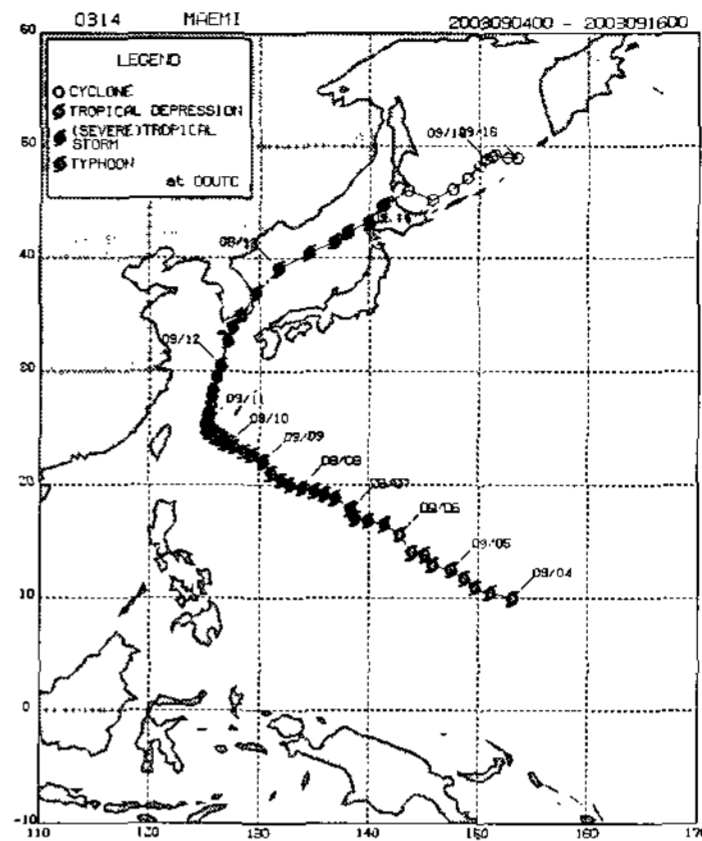


그림 3. 태풍 "매미" 이동경로  
 Fig. 3 The drift route of typhoon "MAEMI"

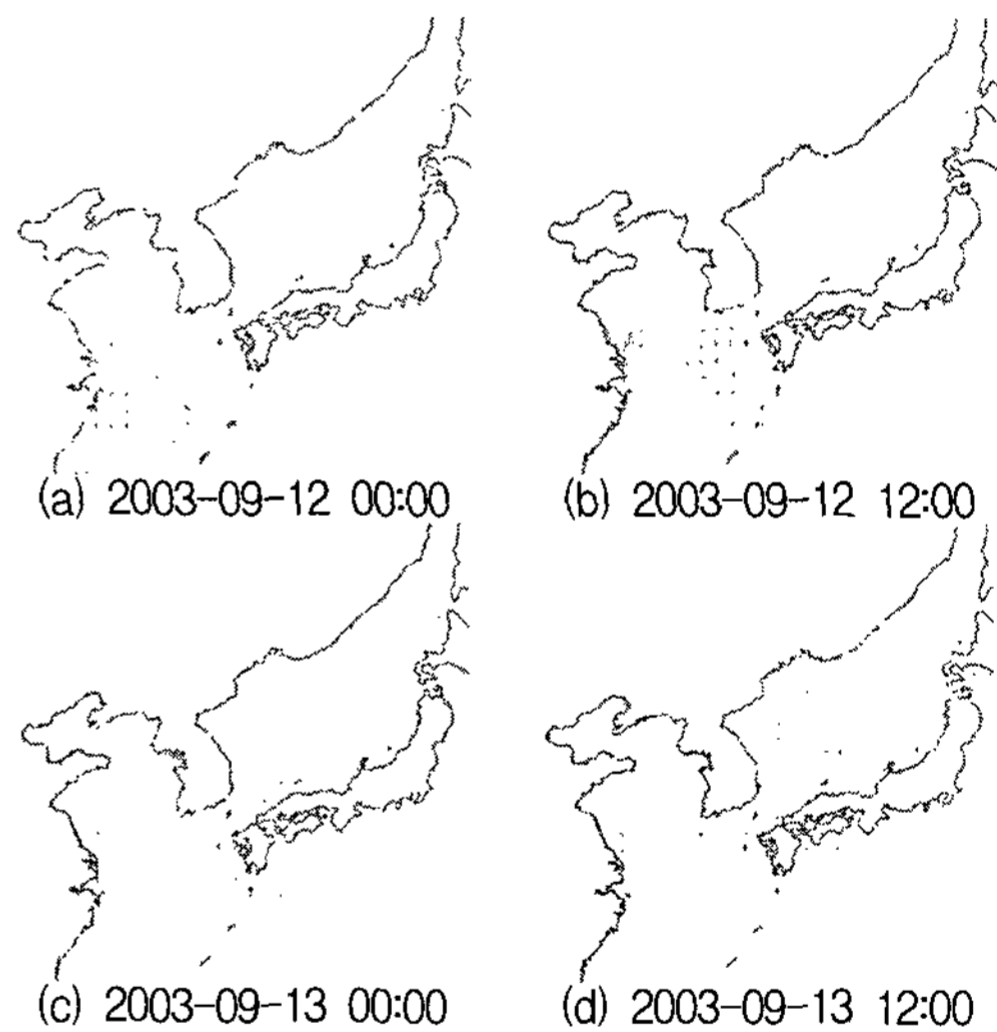


그림 4. 태풍 "매미" 수치실험  
 Fig. 4 The numerical value experiment model of typhoon "MAEMI"



(a) 매쉬생성 (c) Simulation  
 그림 5. ADCIRC 분석  
 Fig. 5 ADCIRC Simulation

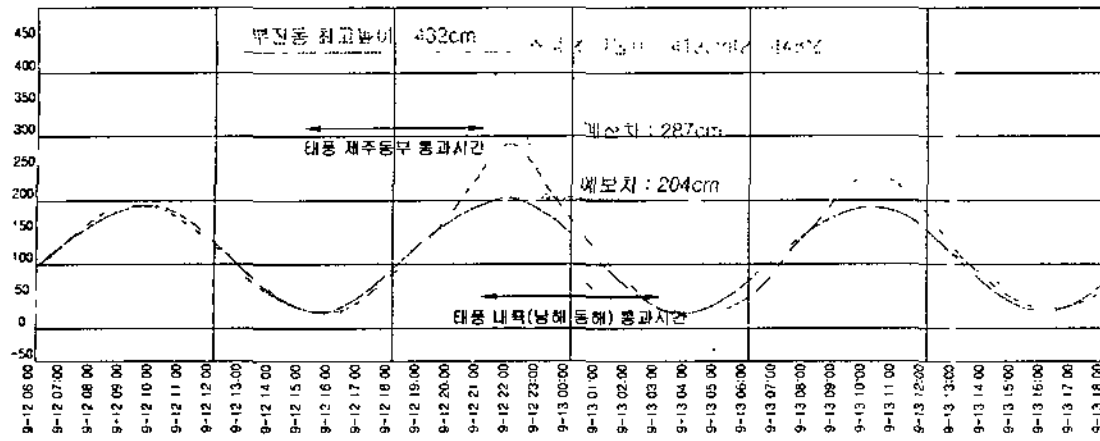


그림 6. 조위분석결과  
Fig. 6 The tide level analysis

조석별 최대범람구역을 산정하기 위하여 1/1,000 수치지도를 이용하여 DEM을 구성한 후 이를 이용하여 조위별 최대범람구역을 산정한 후 실제 관측치와 비교분석하였다.

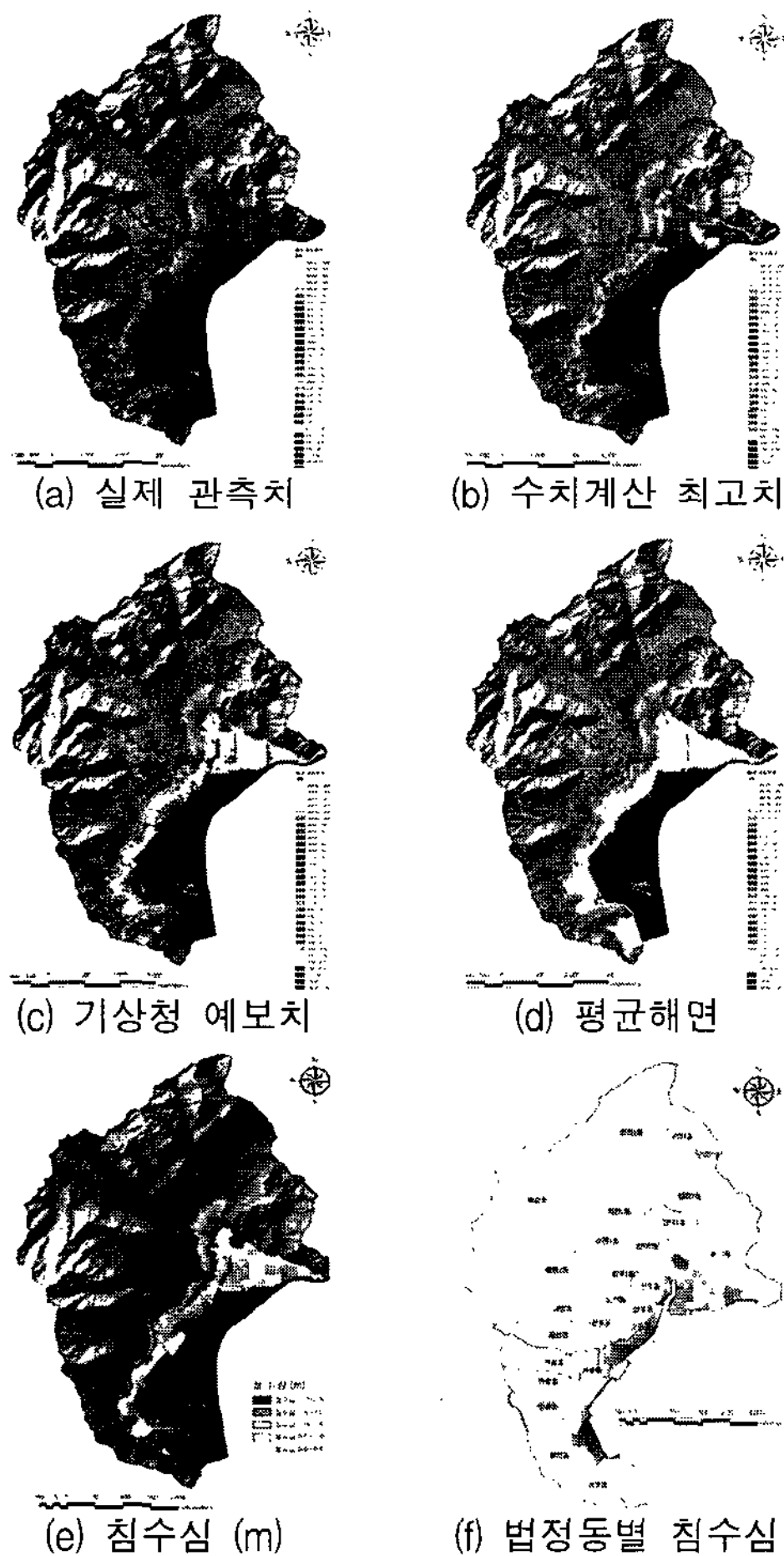


그림 7. 조석별 최대침수구역 비교  
Fig. 7 The Maximum flood area comparison

#### IV. 경제성 분석

구체적인 편익·비용분석의 기준 또는 지표로는 편익·비용비(B/C ratio; Benefit-Cost ratio), 순현재가치(NPV; Net Present Value) 및 내부수익률(IRR; Internal Rate of Return)과 같은 기법들이 이용되고 있다. 이러한 평가방법은 투자사업을 평가하는데 서로 배타적인 개념이 아니라 보완적인 기준으로 쓸 수 있다.

경제성 분석의 근본적인 목적은 국가경제의 전체적인 입장에서 사업의 타당성을 분석하는 것이다. 이를 위해서는 사업 전후의 각종 편익과 비용을 추정한 후, 순현재가치(NPV), 내부수익률(IRR), 비용편익비(B/C) 등의 경제성 평가지표를 활용하여 경제성을 평가한다[6].

본 연구대상지역의 각 빈도별 예상침수구역의 경제성분석을 실시하여 침수사업의 우선순위를 결정하였다. 따라서 본 연구의 침수사업 우선순위 결정은 위의 3가지 기법 중 여러 가지 사업을 객관적인 입장에서 비교할 수 있는 비용편익비(B/C)를 적용하였다.

태풍해일로 인한 침수구역은 연구대상지역의 분석을 통하여 법정동을 기준으로 10개 구역로 구분하였으며, 분석기준년은 100년 빈도이고 각 구역당 침수면적 분석은 ArcGIS를 이용하였고, 인구, 세대수, 자산등은 마산시 통계연보와 재해연보를 참조하여 비교분석하였다.

표 1은 법정동을 기준으로 나눈 구역별 침수심을 나타낸 것이다.

표 1. 구역별 침수심  
Table. 1 The local inundation depth

구역명	침수심(m, ha)			
	0.0~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0
월영동	10.34	3.54	22.14	41.15
문화동	2.07	3.82	13.30	0.20
반월동	4.35	7.91	12.71	0.00
중앙동	1.01	1.05	1.78	0.00
동서동	0.00	2.51	44.63	15.69
오동동	0.89	1.82	9.09	10.50
합포동	1.82	2.27	10.07	0.50
산호동	4.42	3.01	10.31	3.20
양덕2동	5.03	4.34	14.16	10.14
봉암동	20.52	7.10	152.84	14.85

본 연구의 사업대상구역내에 100년 빈도를 적용 하였을 때 치수사업의 우선순위로 선정하였으며 결과는 표 2 과 같다.

표 2. 치수사업 우선순위  
Table. 2 The order of priority floodplan control

구역명	B/C	NPV	IRR	순위
월영동	1.327	12032.94	8.198	1
문화동	1.083	2224.59	6.578	4
반월동	1.193	4554.63	7.324	3
중앙동	0.662	-14019.5	3.393	9
동서동	1.005	223.85	6.039	6
오동동	1.208	5393.28	7.422	2
합포동	1.013	400.97	6.094	5
산호동	0.953	-1621.18	5.663	7
양덕2동	0.738	-12356.1	4.024	8
봉암동	0.562	-24807.2	2.491	10

## V. 결 론

본 연구는 GIS를 이용하여 태풍해일의 침수구역을 분석하였으며, 이를 실제 침수구역과 비교분석한 후 법정동을 기준으로 나눈 구역별 침수심을 산출하고 MD-FDA를 이용한 치수경제성 분석을 실시한 것으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, MD-FDA를 이용한 치수경제성 분석을 비용편익비(B/C)에 따라 우선순위를 결정한 결과 인명피해등 실제 침수피해가 가장 크게 나타났던 월영동이 1순위로 나타났으며, 마산만의 가장 안쪽에 위치하고, 상대적으로 재산피해가 작았던 봉암동이 10순위로 나타났다.

둘째, 각 침수면적 및 침수심을 GIS를 이용하여 산정하였고, 이를 이용하여 경제성분석을 실시함으로써 실무에서 적용시 효율성을 높일 수 있는 방안을 제시하였다고 판단된다.

셋째, 본 연구에서 수행한 GIS기법과 침수예측을 위한 수리모형의 연계는 예상침수지역의 자료획득 및 처리과정이 복잡한 다차원 홍수피해산정법의 단점을 보완할 수 있었으며, 보다 공간적인 측면에서의 접근이 가능하였다.

## 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.
- [3] Luettich, R.A., Jr., Westerink. J.J., and Scheffner, N.W., ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelevs coasts and estuaries, Report 1: Theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. Technical Report DRP-92-6, U.S. Army Corps of Engineers, 1992.
- [3] Robert J. Weaver, Effect of wave forces on storm surge, The degree of master of science, University of Florida, 2004.
- [4] ADCIRC Home page(<http://www.adcirc.org/>)
- [5] 최현, 안창환, GIS와 MD-FDA를 연계한 예상침수지역의 경제성 분석, 한국측량학회지, 제25권 제6-2호, pp599~611, 2007.
- [6] 최현, 윤흥주, 안창환, MD-FDA와 GIS를 이용한 태풍해일 침수지역의 경제성 분석, 한국해양정보통신학회 추계학술발표회, pp995~998, 2007.

## 저자소개

최 현(Choi, Hyun)



1998년 부경대학교 토목공학과  
(공학사)

2000년 부산대학교 대학원 토목공학과  
(공학석사)

2004년 부산대학교 대학원 토목공학과(공학박사)

2006년 ~ 현재 경남대학교 토목공학과 교수

※관심분야 : 원격탐사, 사진측량학, GIS, 3D-GIS, Virtual Reality, ITS, GPS.

안 창 환(Ahn, Chang-Hwan)



2002년 경남대학교 토목공학과  
(공학사)

2004년 경남대학교 대학원  
토목공학과(공학석사)

2008년 경남대학교 대학원 토목공학(박사수료)

2004년 ~ 현재 (주)두레 수자원부 차장

※관심분야: 원격탐사, GIS, GPS, 수문해석