

## GIS를 이용한 2차원 홍수범람정보의 3차원 가시화

## Information of Flood Estimation using GIS for Three Dimensional Visualization

이진우\* · 김형준\*\* · 조용식\*\*\*

Lee, Jin Woo · Kim, Hyung-Jun · Cho, Yong-Sik

## Abstract

This study simulated the flood inundations of the Nakdong River catchment running through Yangsan, a small city located in the south eastern area of Korea by using the depth averaged two-dimensional hydrodynamic numerical model. The numerical model employs the staggered grid system including moving boundary and a finite different method to solve the Saint-Venant equations. A second order upwind scheme is used to discretize the nonlinear convection terms of the momentum equations, whereas linear terms are discretized by a second order Leap-frog scheme(Cho and Yoon, 1998). The numerical model was applied to a real topography to simulate the flood inundation of the Yangsan basin in Yangsan. The numerical result for urban district was visualization for three dimension. These results can be essentially utilized to construct the three dimensional inundation map after building the GIS-based database in local public organizations in order to protect the life and property safely

**Key word** : Saint-Venant equation, inundation, Moving boundary, Staggered grid, Three dimensional inundation map

## 요 지

본 연구에서는 경상남도 양산시를 통과하여 흐르는 양산천 유역에서의 홍수범람을 3차원 공간정보를 이용하여 모의하였다. Saint-Venant 방정식을 지배방정식으로 사용하였으며, 지배방정식의 선형항은 풍상차분기법을 이용하여 해석하였고 비선형항을 해석하기 위해서 Leap-frog 기법을 사용하였다. 홍수빈도에 따른 수치모의 결과는 3차원으로 가시화 되어 웹(web)상에서 제공되며 결과를 3차원적으로 가시화를 시킴으로서 2차원 도면상에 표시하여 제공하는 수치모의결과보다 대상 행정기관의 업무능률 향상과 대민서비스의 질을 향상시킬 수 있을 것이다. 본 연구를 통해 얻어진 수치모의 결과는 GIS를 이용한 3차원 홍수지도 작성에 사용될 수 있으며, 각 지방자치단체에 제공하므로써 홍수로 인한 피해를 감소시키는데 효율적일 것이다.

**핵심용어** : Saint-Venant 방정식, 홍수범람, 이동경계조건, 엇갈림격자, 3차원 홍수지도

## 1. 서 론

최근 기상이변에 의해 발생하는 태풍이나 집중호우에 의한 홍수피해는 자연재해 중 피해규모가 크고 빈번한 재해로서 피해의 상당부분이 하천 인접지역, 토지이용의 고도와에 따른 인구와 산업, 주거 및 사회기반시설 등이 밀집된 도시지역에서 발생하고 있다. 매년 반복되는 홍수피해를 감소시키고 인명 및 재산피해를 줄이기 위하여 하천재방 및 댐의 정비, 저류시설의 확충과 같은 구조적인 대책이 수립되고 있으나 홍수 시 발생 가능한 제방붕괴에 의한 내수범람, 우수관거의 통수능력 상실에 의한 제내지의 침수등과 같은 사고에 대한 대표적인 대책으로 홍수범람지도를 작성하여 정보를 제공하는 방법이 있다. 홍수범람지도는 평상시에 치수사업 계획 시 좀 더 정확한 타당성 분석을 하는데 필요한 입력자료로 활용

되며, 치수사업의 범위를 결정하는 중요한 역할을 한다. 또한, 홍수 시에는 범람 예상구역도의 작성 및 홍수 예력<sup>3)</sup> 체제를 확립함으로써 피해 예상지역의 수해민의 신속한 대피를 유도하고, 적절하고 신속한 수방대책을 수립하는데 반드시 필요하다.

하지만, 기존의 홍수지도는 2차원으로 작성되어 제공되어 왔다. 이러한 2차원 홍수지도는 지도상에 단순히 홍수에 의한 범람영역을 표시하는 부분에만 국한되어 있기 때문에 제내지부분에 대한 정확한 침수심과 유속 등의 정보를 제공하고 있지 않다. 따라서, 홍수범람영역을 3차원 홍수지도를 통해 제공하게 된다면 제내지의 지형정보에 따른 침수심과 유속 등을 보다 효과적으로 제공할 수 있으며, 입체적으로 피해정보를 제공할 수 있으므로 효율적으로 범람이나 침수에 의한 피해를 관리할 수 있을 것이다. 또한, 최근 2차원 평면

\*한양대학교 대학원 토목공학과 석·박사과정 (E-mail: moonguy@hanyang.ac.kr)

\*\*정회원 · 한양대학교 대학원 토목공학과 박사수료

\*\*\*정회원 · 한양대학교 토목공학과 교수 공학박사

적 공간정보의 수요에서 입체적이고 다양한 3차원 공간정보의 수요로 전환이 되고있으며 이에따라 GIS(Geographic Information System, 지리정보시스템)를 이용한 3차원 홍수지도제작이 요구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 3차원 홍수지도제작에 앞서 유량 빈도별 수치해석 결과를 이용하여 양산천 유역에서의 홍수범람정보를 3차원으로 가시화하였다. 3차원으로 홍수범람정보를 제공하므로 홍수범람에 의한 제내지 지역에서의 피해정보를 보다 정확하게 제공하고 피해지역의 범람현황 및 통계현황을 제공함으로써 사용자 하여금 홍수범람에 의한 피해를 체계적으로 관리할 수 있도록 하였다.

## 2. 수치모형 및 수치모의

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 2차원 Saint-Venant 방정식을 이용하여 2차원 수치모형을 개발하였다. 2차원 Saint-Venant 방정식은 연속방정식과 운동량방정식으로 표현된다. 운동량방정식은 시간과 공간에 따른 운동량의 변화를 나타내는 국부가속도와 이송가속도항, 중력항, 하상경사항 및 마찰경사항 등으로 구성된다.

운동량방정식의 오른쪽에 포함된 마찰경사는 Manning 공식을 이용하여 식 (1)~(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{fx} = \frac{gn^2}{h^{4/3}} u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

$$S_{fy} = \frac{gn^2}{h^{4/3}} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2)$$

비보존형 방정식은 차분화하면 보존법칙을 만족할 수 없을 수 있으므로 계산과정에서 발생하는 오차가 누적되므로 상당한 계산오차를 가져올 수 있다. 그러므로 수치모형에서는 다음과 같은 보존형 방정식을 사용한다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{PQ}{h} \right) + gh \frac{\partial h}{\partial x} = gh(S_{ox} - S_{fx}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q^2}{h} \right) + gh \frac{\partial h}{\partial y} = gh(S_{oy} - S_{fy}) \quad (5)$$

식 (3)~(5)은 보존형방정식으로서 질량 및 운동량 보존법칙을 잘 만족시키는 것으로 알려져 있다. 식 (4)과 (5)에서  $P$ 와  $Q$ 는 각각  $x$ 축 방향 및  $y$ 축 방향의 단위폭당 유량으로 수심과 유속을 사용하여  $P = uh$ 와  $Q = vh$ 로 나타낼 수 있다.

### 2.2 수치모형

본 연구에서는 2차원 Saint-Venant 방정식을 해석하기 위하여 양해법의 일종인 Leap-frog기법과 운동량방정식에 포함된

비선형항의 정확도를 향상시키기 위하여 2차 정확도를 갖는 풍상차분기법(upwind scheme)을 사용하였다(인태훈 등, 2003). Leap-frog기법에서는 경계조건 설정 및 계산상의 편의를 위하여 변수  $h, P, Q$ 의 계산점을 겹치지 않도록 배치한 엇갈림 격자(staggered mesh in time and space)를 사용하였다.

Leap-frog기법을 이용한 연속방정식의 차분식은 다음과 같다.

$$\frac{h_C^{n+1/2} - h_C^{n-1/2}}{\Delta t} + \frac{P_{i+1/2,j}^n - P_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} + \frac{Q_{i,j+1/2}^n - Q_{i,j-1/2}^n}{\Delta y} = 0 \quad (9)$$

본 연구에서는 운동량방정식의 비선형 이송항에 2차 정확도의 풍상차분기법을 사용하였다. Shyy(1985)의 연구결과에 의하면 2차 정확도의 풍상기법은 식 (10)과 같다.

$$\left| \frac{\partial(u\phi)}{\partial x} \right|_{i,j} = \frac{3u_{i,j}\phi_{i,j} - 4u_{i-1,j}\phi_{i-1,j} + u_{i-2,j}\phi_{i-2,j}}{2\Delta x} + T_c(u \geq 0)$$

$$\frac{-3u_{i,j}\phi_{i,j} + 4u_{i+1,j}\phi_{i+1,j} - u_{i+2,j}\phi_{i+2,j}}{2\Delta x} + T_c(u < 0) \quad (10)$$

1차 정확도의 풍상차분기법의 절삭오차는  $O(\Delta x)$ 의 크기를 갖으며, 2차 정확도의 풍상차분기법은  $O((\Delta x)^2)$ 의 절삭오차를 갖는다. 따라서, 절삭오차를 비교해보면 2차 정확도의 풍상차분기법이 지배방정식을 보다 정확하게 모의할 수 있음을 알 수 있다.

### 2.3 침수모형 입력기

본 연구에서는 Fortran언어로 구축된 수치모형을 일반 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 침수모형 입력기를 이용하여 수치모의가 가능하도록 하였다. 침수모형 입력기는 침수모의시스템의 실행을 위한 침수시나리오 및 경계조건을 입력하는 것으로 그림 2와 같다. 침수모형 입력기는 크게 침수시나리오 입력, 경계조건 입력, 모의조건 입력의 세부분으로 나눌 수 있다.

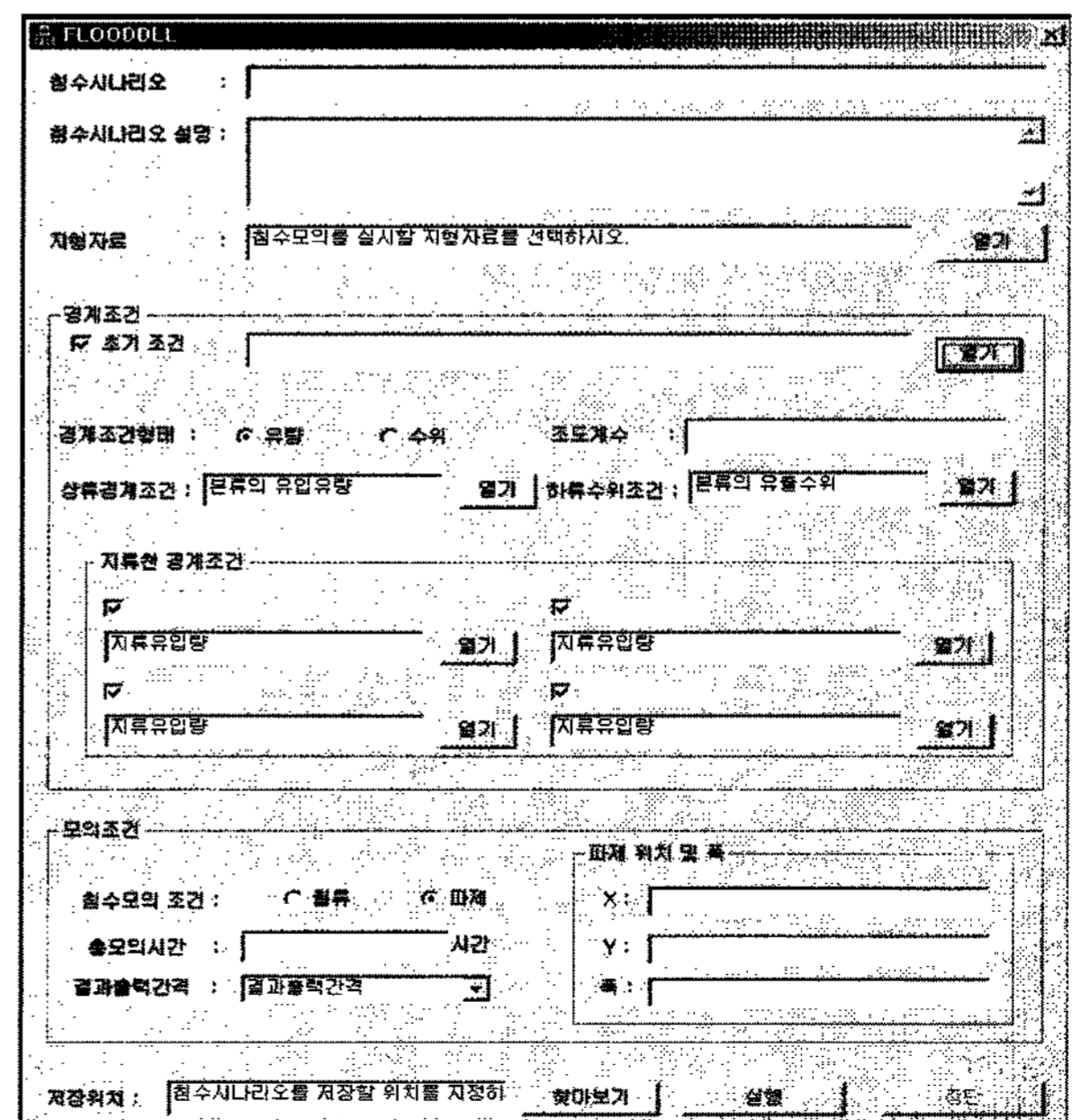


그림 1. 침수모형 입력기

먼저 침수시나리오 입력 부분에서는 침수시나리오명과 침수시나리오에 대한 설명을 입력할 수 있다. 이는 웹(web)상에서 3차원으로 결과를 가시화할 때 다양한 조건의 침수시나리오를 구분하기 위한 정보로서 제공이 되며 가시화 단계에서 사용자에게 시나리오에 대한 간략한 정보를 전달하는 역할을 한다. 지형자료는 Arc/Info 형식의 DEM(Digital Elevation Model)을 사용하여 입력하도록 하였다. 경계조건 입력부분에서는 조도계수와 본류 및 지류의 경계조건 등을 입력하도록 되어있다. 침수모의를 위한 조도계수는 전 유역의 평균 조도계수를 입력할 수 있도록 하였으며, 본류의 상류 경계조건은 시간당 유량 값 및 수위 값을 선택하여 입력할 수 있도록 하였다. 또한 본류의 하류 경계조건은 시간당 본류에서의 유출수위를 입력하도록 하였다. 각 지천에서의 경계조건 또한 시간당 유량값으로 입력하도록 하였다. 각 지천의 영향을 고려할 때는 1~4개의 지천을 포함하여 수치모의를 진행할 수 있도록 하였다. 따라서, 본 연구에서 개발한 수치모형에서는 대상유역 내에서 본류를 포함한 최대 4개 지천을 함께 모의할 수 있도록 하였다. 본류와 지천의 경계조건들은 시계열을 갖는 \*.dat로써 입력이 된다. 마지막으로 모의조건의 입력부분에서는 홍수범람이 일어나는 두가지의 원인에 따라 월류 또는 파제의 침수모의 조건을 선택할 수 있게 하였다. 파제로 인한 홍수범람이 일어날 경우를 모의할 때 파제위치 및 폭을 입력할 수 있게 하였으며, 파제위치는 UTM(Universal Transverse Mercator)좌표로 입력한다. 총 모의시간은 시간단위로 입력할 수 있게 하였고 수치모의 결과출력간격은 10분 단위로 선택할 수 있도록 하였다.

### 3. 수치모형의 적용

#### 3.1 대상유역

본 연구에서는 홍수범람정보의 3차원적인 가시화를 위해 낙동강의 지류로서 경상남도 양산시를 통과하여 흐르는 양산천의 국가하천 구간을 선정하여 수치모의를 실시하였다. 양산지역은 행정구역상 양산시 강서동, 동면 및 삼성동에 걸쳐 위치하며 택지개발이 완료된 주거 밀집지역이 분석대상지역 중 상류 좌안에 위치하고 좌안 하류측 및 우안 하류측도 장래 도시개발 계획이 수립되어 있어 지속적인 인구유입이 예상되는 지역이다. 지역내 주요시설물로는 양산하수처리장 및 양산종합운동장 등이 있으며, 양산-구포간 고속도로와 경부고속도로가 북북동에서 남남서 방향으로 형성되어 있다. 본 연구의 대상유역은 그림 2와 같다.

#### 3.2 경계조건

수치모형에서 적용한 경계조건은 양산천 본류와 각 지천을 중심으로 빈도별로 적용하였다. 양산천의 상류 경계조건과 각 지류의 경계조건은 홍수량과 수위-수문곡선을 이용하여 시간에 따른 유량의 변화로 입력하였고, 하류 경계조건은 낙동강 본류에 대한 부정류 해석을 실시하여 산정한 양산천 하류에 해당되는 낙동강의 기본계획 측정지점의 홍수위 수문곡선을 이용하여 시간에 따른 수위 변화의 값을 입력하였다. 모형에

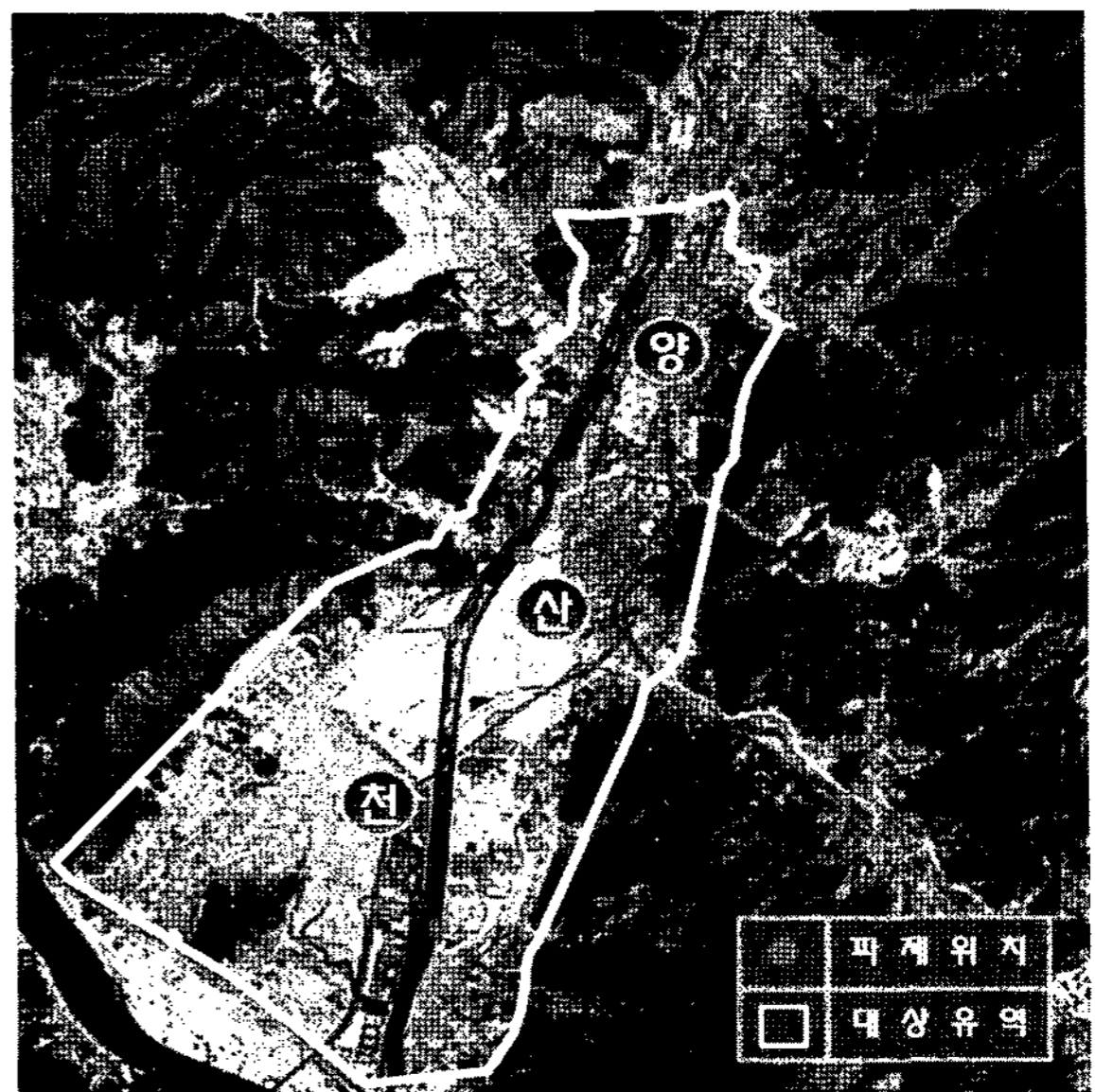


그림 2. 대상유역 및 파제 위치

적용된 수문곡선들은 그림 3~5와 같다. 우리나라 국가하천의 계획빈도는 100~200년 빈도로 설정되어있지만 최근 이상기후에 따른 집중호우의 영향을 고려하기 위하여 100, 200,

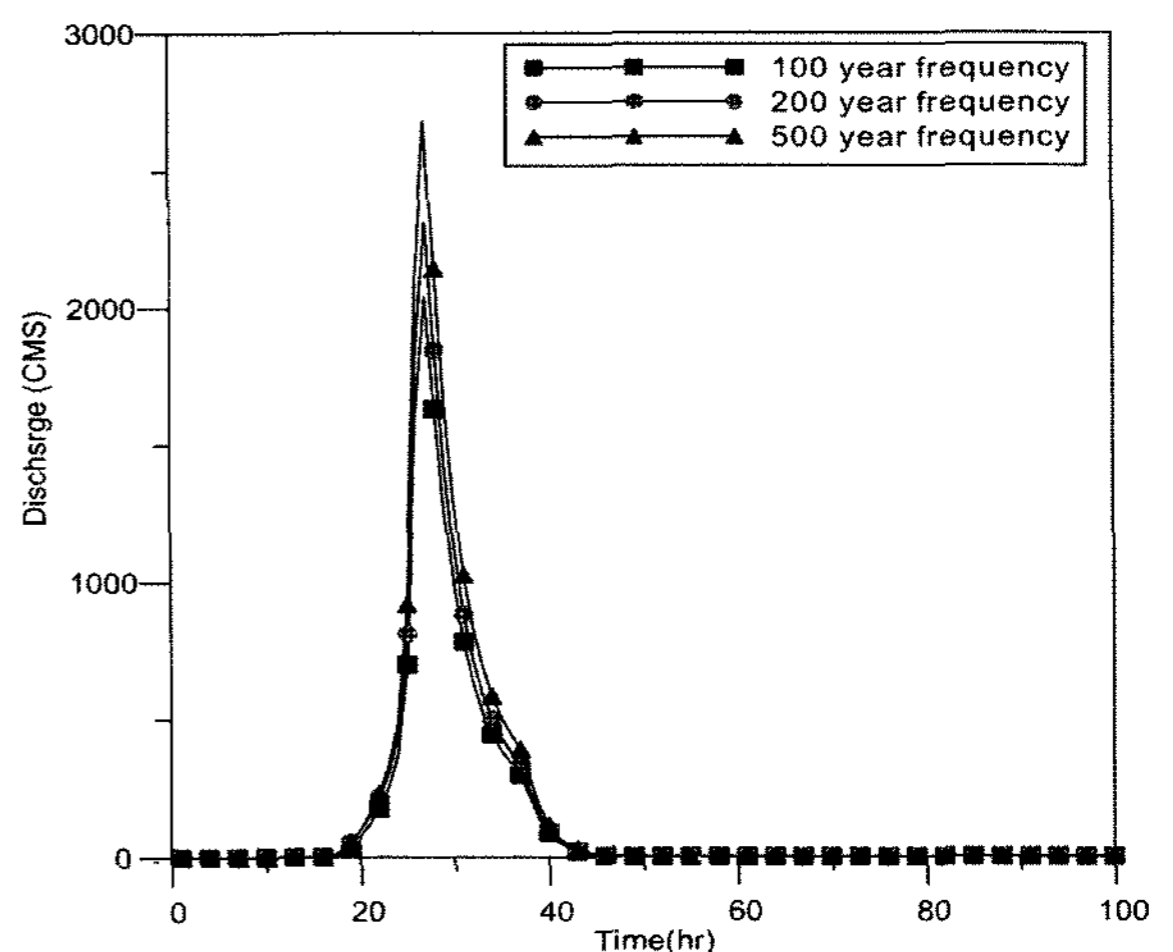


그림 3. 양산천 본류의 상류 경계조건

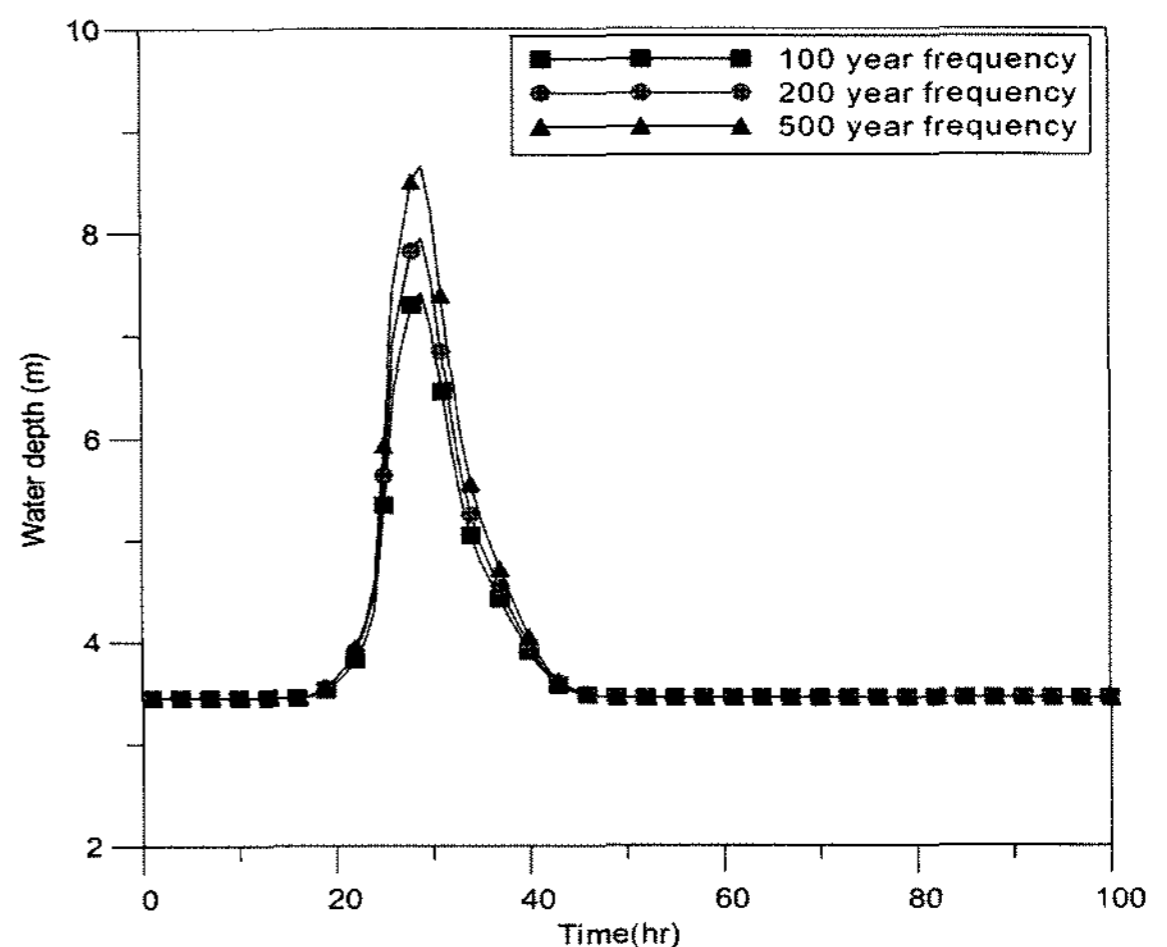


그림 4. 양산천 본류의 하류 경계조건

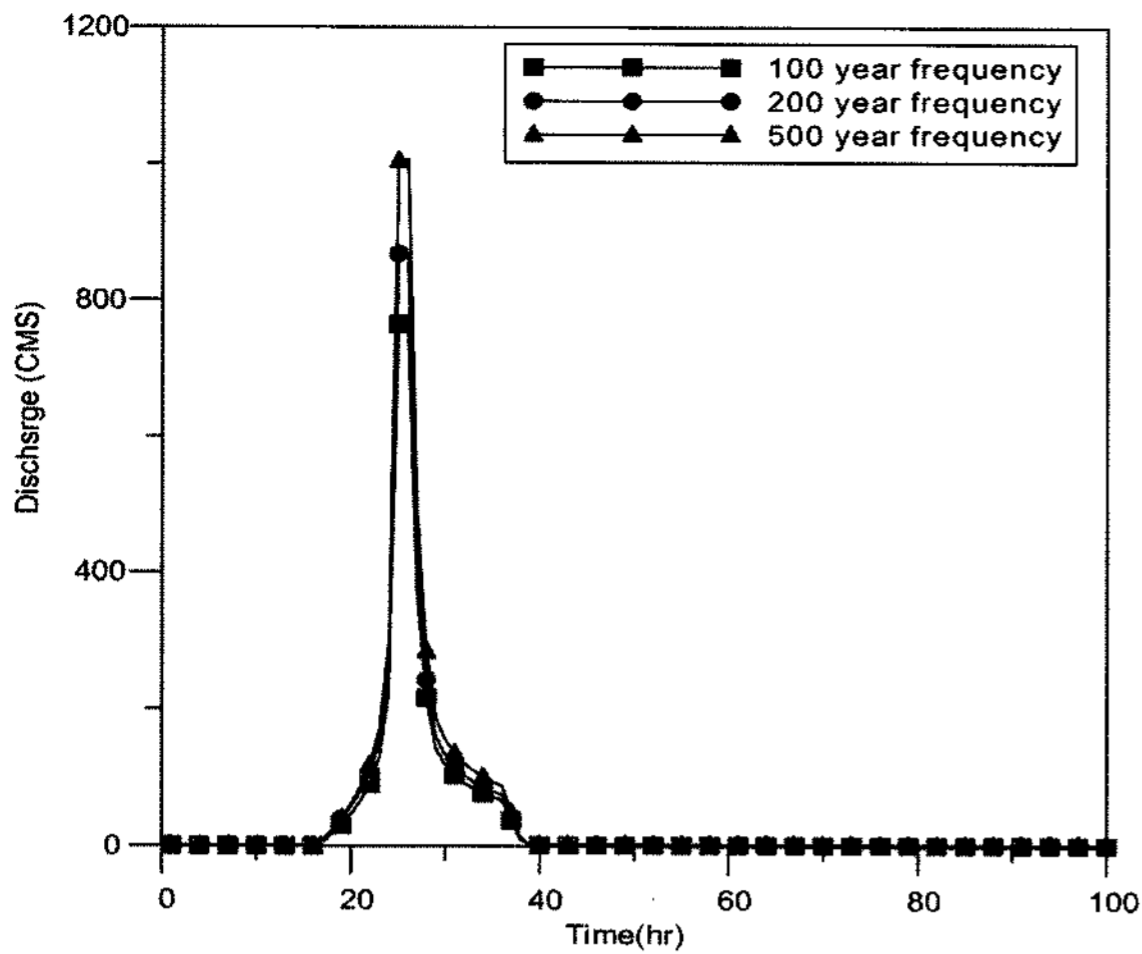


그림 5. 양산천 지류의 경계조건 (다방천)

500년 빈도의 홍수량을 이용하여 수치모의를 실시하였다.

### 3.3 GIS를 이용한 3차원 가시화

본 연구에서의 수치모의 결과로 얻은 홍수범람정보는 3차원으로 가시화되어 양산시 3차원 도시침수관리시스템에서 제공된다. 그림 6은 3차원 도시침수관리시스템의 구성도이다.

3차원 도시침수관리시스템은 도시 침수 관리 업무 지원을 위해 수리분석을 위한 2차원 수치모형을 입력하고 3차원에 기반을 둔 침수분석과 예측을 수행한다. 또한, 침수예측 및 사후관리를 주 목적으로 파제지점 및 침수 시나리오를 선택하면 침수모형 입력기에 의해 입력된 사용자의 의사결정조건에 따라 3차원 GIS 모델링을 수행한다. 또한 도시침수 관련 업무를 효과적으로 지원하기 위하여 침수에 관련된 분석 및 통계정보를 효과적으로 제공하여 새로운 분석결과를 제시하는 기능, 침수에 대한 시뮬레이션을 통하여 피해예상지역을 선정하여 침수피해 예방을 지원하는 기능, 침수피해 분석 결과를 체계적으로 관리할 수 있는 기능을 제공한다. 아울러 발생된 침수에 신속한 복구 및 지원 전략에 도움을 주고 대처방안을 세우는 것을 목표로 하고 있다.

본 연구에서 수행한 2차원 수치모의 결과는 대상유역내 각 격자점에 대한 수위값을 갖는다. 위도와 경도로 구분된 각 격자점의 수위값을 GIS를 이용한 3차원 지도상에 나타내어 도시침수 관리시스템을 통해 가시화 한다. 그림 7~12는 본

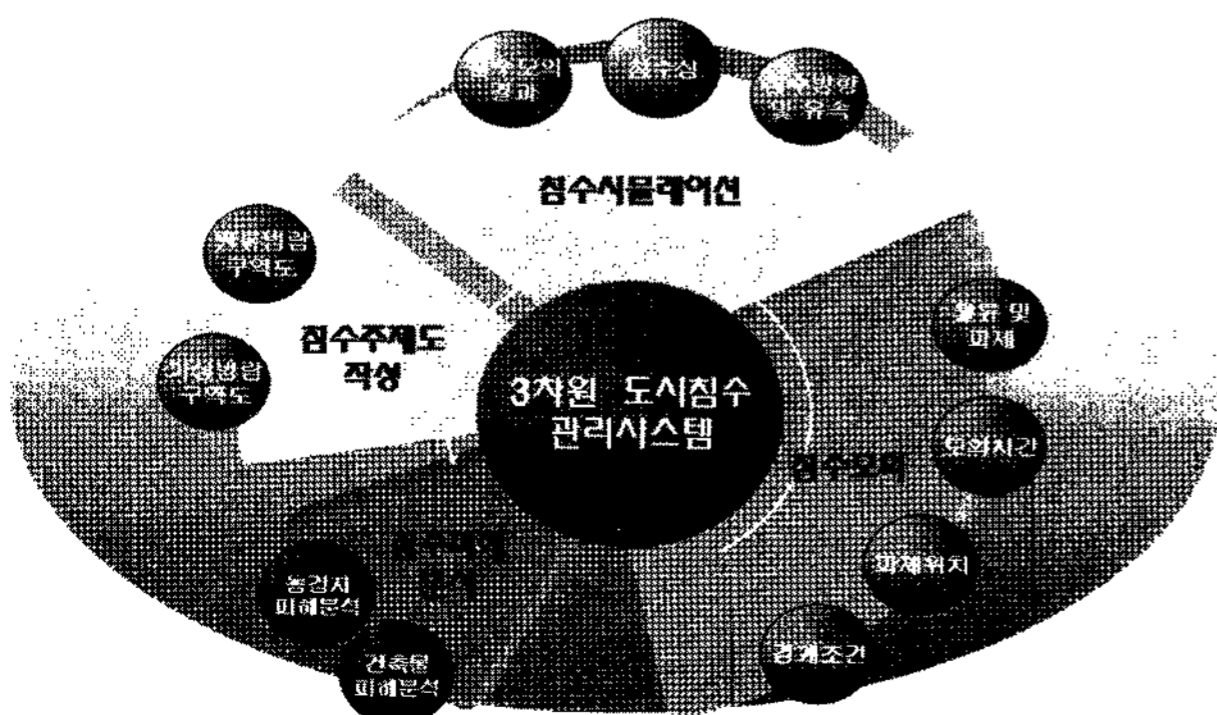


그림 6. 3차원 도시침수 관리시스템의 구조도

연구 결과를 3차원 도시침수 관리시스템에서 가시화한 것이다. 그림 9는 양산시 신도심 지역에서 파제가 일어났을 경우를 모의한 결과이다. 가상으로 선정된 파제지점으로부터의 침수영역을 침수심에 따라 잘 표현하고 있음을 알 수 있다. 그림 10은 500년 빈도의 유량으로 인해 양산천 하류의 무제부 구간에서의 월류로 인한 침수영역을 표현하고 있다. 또한 그림 11~12는 월류나 파제로 인하여 침수범람이 발생하였을 경우 침수영역내에서의 농경지와 건축물에대한 침수피해정도를 나타내고 있다. 이러한 피해분석은 체계적으로 피해현황을 관리하고 효율적인 피해복구대책을 수립하는데 도움이 될 것이다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 2차원으로 작성된 기존의 홍수지도와 달리 파제 및 월류에 의한 피해정보제공이 더욱 효과적인 3차원 홍수지도 제작에 앞서 기 구축되어있는 2차원 수치모형의 결과를 통해 얻은 홍수범람정보를 3차원으로 가시화 하였다. 단순히 2차원 도면상에 표시하여 사용자에게 제공하는 수치모

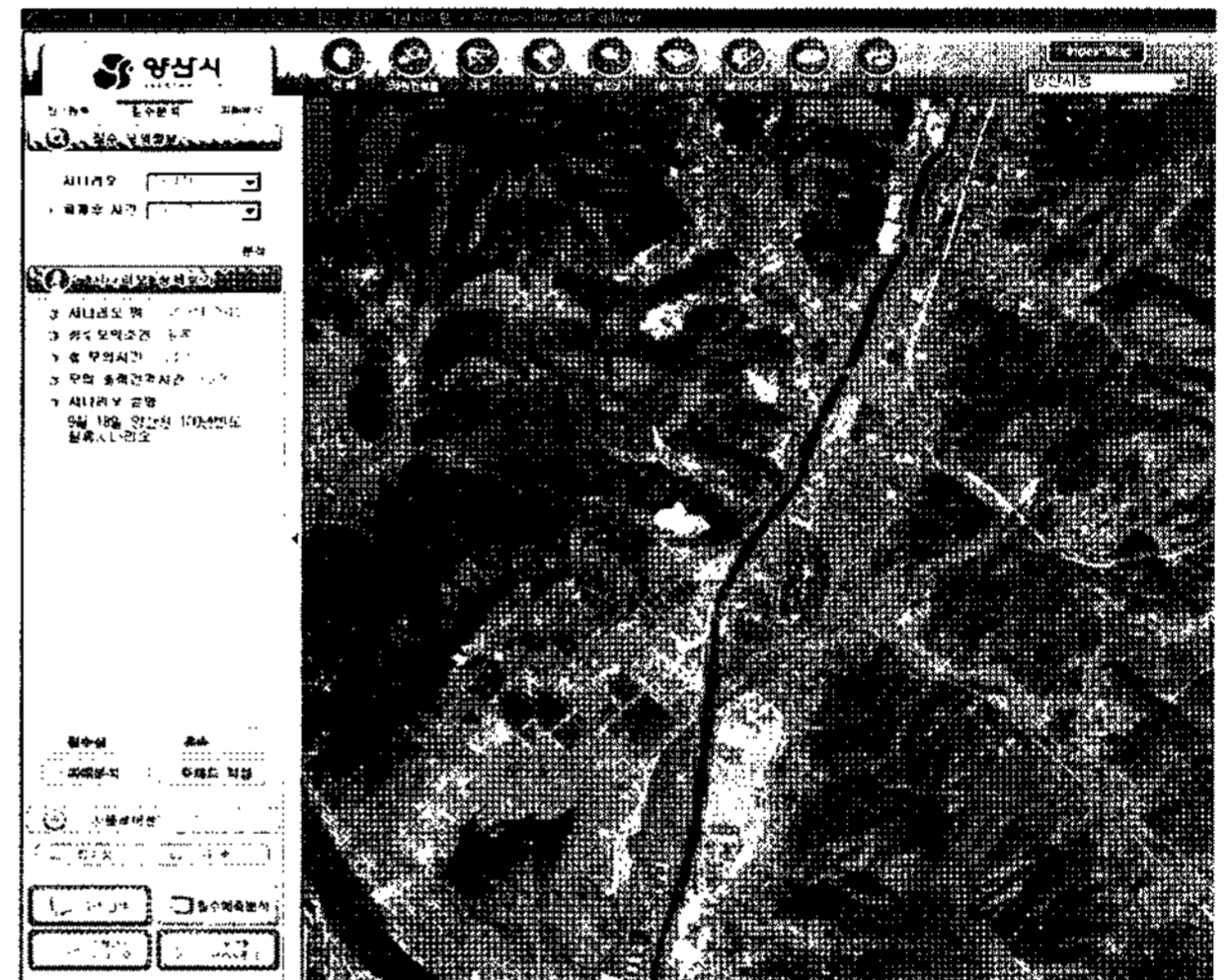


그림 7. 3차원으로 가시화된 양산천 흐름도

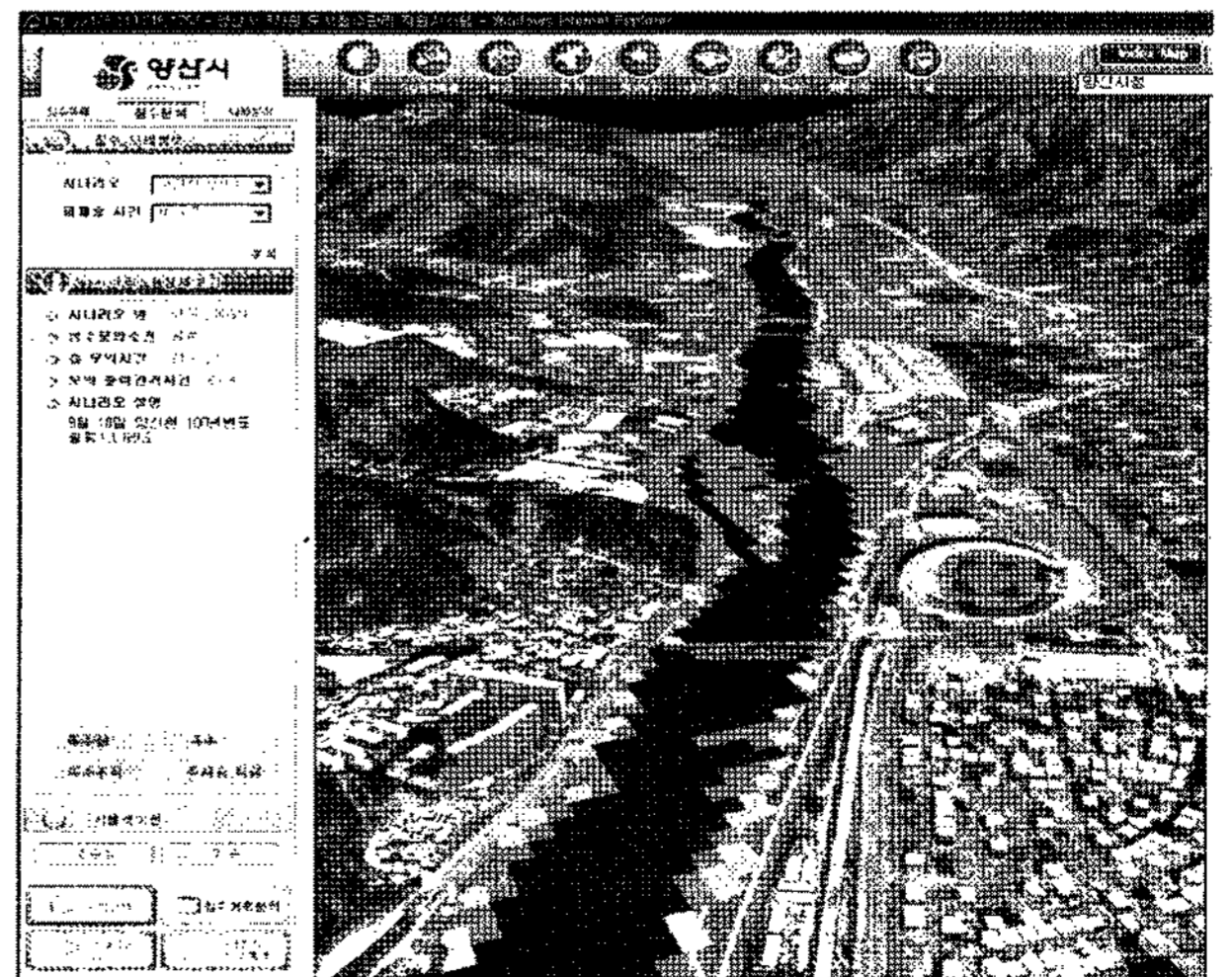


그림 8. 3차원으로 가시화된 양산천 침수심



기를 이용하여 수치모의가 이루어지도록 하였기 때문에 실제 사용자로 하여금 파제나 월류에 대한 홍수범람의 정도와 범람 영역을 손쉽게 구현할 수 있도록 하였다.

홍수범람정보를 3차원으로 가시화함으로써 침수에 관련된 분석, 침수에 의한 피해정보와 통계정보를 효과적으로 제공할 수 있으며 가시화된 결과를 상황별로 활용가능한 3차원 홍수 지도로 작성 및 제시한다면 최근 급증하고 있는 기상이변에 의한 홍수범람과 침수 대한 보다 효과적이고 체계적인 관리가 이루어 질 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 해양수산연구개발사업(지진해일에 의한 동해 연안항 및 무역항 설계해면 산출)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

신영호 (2002) 홍수지도 시범제작 방안. 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제35권, 제4호, pp. 38-49.

- 유재홍, 김형준, 조용식 (2005) 홍수범람모의를 위한 내외수 연계 모형 개발. 한국방재학회논문집, 한국방재학회, 제5권, 제4호, pp. 1-8.
- 이주현, 최종진, 이희철, 이은태 (2003) 고해상도 수치고도모형을 활용한 홍수범람도의 작성. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제23권, 제6B호, pp. 471-478.
- 원성연, 윤용남 (1993) 도시유역의 홍수량 산정을 위한 도시유출 모형 연구. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제13권, 제5호, pp. 135-146.
- 한건연, 최규현, 이창희 (2002) 도시침수해석을 위한 2차원 모형의 개발. 한국수자원학회 학술발표회 논문집(I), 한국수자원학회, pp. 275-280.
- Cho, Y.-S., and Yoon, S.-B. (1998) A modified leap-frog scheme for linear shallow-water equations. *Coastal Engineering Journal*, Vol. 40, No. 2, pp. 191-205.
- Shyy, W. (1985) A study of finite difference approximation to steady-state, convection dominated flow problems. *Journal of Computational Physics*, Vol. 57, pp. 408-415.

- ◎ 논문접수일 : 2008년 01월 02일  
◎ 심사의뢰일 : 2008년 01월 02일  
◎ 심사완료일 : 2008년 02월 24일