

사면구조 격자 기법에 의한 2차원 홍수범람모형의 적용

Application of a Two-dimensional Flood Inundation Model based on Quadtree Grid

김종호* · 이승오** · 윤광석*** · 조용식****

Kim, Jongho · Lee, Seung Oh · Yoon, Kwang Seok · Cho, Yong-Sik

Abstract

All measures to cope with flooding rely on flood predictions to some extent. To investigate these predictions such as maximum water level or inundation area, a numerical model has been developed. The governing equations of the model are the two-dimensional Saint-Venant equations. The governing equations are discretized explicitly by using the leap-frog scheme and upwind scheme based on quadtree grids. The predicted numerical results have been verified by comparing to those of a Thacker problem. As a result of verifications, the present model is not only nearly four times as efficient as uniform grids but also in close agreement with the previous models. Next, the developed model is applied to several flood events in the Uiryeong basin. A general tendency is found that as a frequency is increasing, overall water levels including peak water level are increasing. At only a 500 year frequency, maximum water level is higher than 18.5 m. Therefore, it can be predictable that inundation will be generated in a 500 year frequency.

Key word : Flood inundation model, Quadtree grid, Saint Venant equations

요 지

홍수 예방을 위해 사용되는 구조적 또는 비구조적 대책의 성공여부는 홍수 예측의 정확도에 달려있다. 본 연구에서는 홍수 범람 발생유무, 범람 면적 또는 최대수위를 예측 및 모의가 가능한 수치모형을 개발하였다. 비선형 Saint-Venant 방정식을 지배방정식으로 사용하였으며, 적합화된 계층적 사면구조 격자를 적용하여, leap-frog 기법과 upwind 기법으로 양해적으로 유한차분하였다. 개발된 수치 모형은 Thacker 문제의 결과와 비교하여 검증하였고, 경상남도 의령 지역에 사면구조 격자를 사용한 본 모형을 적용하였다. 검증 결과 본 모형의 격자는 균일 격자보다 거의 4배 정도 효율적이었으며, 정확도 측면에서도 이전 모델의 결과와 거의 일치함을 알 수 있었다. 다음은 수문 빈도를 변화시키면서 홍수 범람 양상을 수치 모의하였다. 빈도가 증가하면, 침투 수위를 비롯한 수위 수문곡선의 크기도 증가함을 알 수 있었고, 500년 빈도에서는 제방을 월류하여, 제내지에 범람함을 예측할 수 있었다.

핵심용어 : 홍수범람모델, 사면구조 격자기법, Saint Venant 방정식

1. 서 론

우리나라는 태풍, 집중호우와 같은 이상기후의 영향으로 매년 크고 작은 수해가 발생하였고, 이로 인해 최근 10년간 연평균 119명의 인명 피해와 1조 9640억의 재산피해를 입었다(소방방재청, 2007). 특히 2006년 태풍 “에위니아”로 인해 강원도 횡성 지역에 최대 일강우량 921 mm가 발생하였고, 2002년에는 태풍 “루사”로 인해 강릉 지역에 897 mm라는 기록적인 최대 일강우량이 발생하여, 각각 62명과 246명의 인명피해와 1조 8,300억원과 5조 1,400억원의 재산 피해를 발생시켰다(소방방재청, 2007). 따라서 집중호우 및 태풍으로 인해 발생할 수 있는 피해 규모를 사전에 예측하고 예방하는

것은 홍수피해를 줄이는 데 중요한 역할을 한다.

지금까지 반복되는 홍수를 대비하고 피해를 줄이기 위해 하천제방, 댐 및 유수지 건설 등의 구조적인 홍수방지 대책을 수립·시행하는 한편, 풍수해 보험이나 비상대처계획(EAP) 등의 비구조적 대책도 함께 수립해왔다. 그러나 구조물을 이용한 구조적인 홍수피해 저감 대책은 댐과 같은 수리구조물 건설에 따른 환경단체 등의 반대 및 민원발생, 치수구조물의 설계빈도를 초과하는 홍수발생의 우려 그리고 설계빈도를 과도하게 설정하는 경우 구조물의 경제성 문제 등으로 인하여 근본적인 문제 해결에 한계성을 내포하고 있다. 따라서 이러한 구조적 대책의 문제점을 보완하고 비구조적 대책들의 실효성을 높이기 위해서는 수치해석을 통해 홍수 현상을 재현

*한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (E-mail: jhjeheh@hanyang.ac.kr)

**정회원 · 홍익대학교 건설도시공학부 토목공학과 전임강사

***정회원 · 한양대학교 토목공학과 박사과정 (한국건설기술연구원 하천·해안연구실 책임연구원)

****정회원 · 한양대학교 토목공학과 교수 (교신저자)

하고 그에 따른 홍수 범람을 정확하게 예측하는 것이 무엇보다 중요하다.

최근 국내에서도 홍수범람을 예측하기 위해 많은 연구들이 이루어지고 있다. 배용훈 등(2005)은 유한체적법이 적용된 2차원 FLUMEN 수치모형을 이용하여 구리 지역에 적용하였고, 김중호 등(2007)은 제방부근을 상세화한 사면구조 격자를 이용하여 HEC-RAS와 FLUMEN 모형의 결과와 비교하였으며, 최규현 등(2005)은 비정형 요소망을 이용하여 장현 및 동막 저수지 댐 붕괴 사례에 대해 2차원 댐붕괴 모의하였다. 또한 이주현 등(2003)은 강우유출모형(HEC-1)과 수리학적 홍수추적 모형인 HEC-RAS 및 지리정보시스템(GIS)을 연계한 수치모형을 개발하였고, 최규현 등(2006)은 기본 입력자료 구축을 위해서 레이더 자료와 연계하여 레이더 정량강우-홍수 유출-범람해석에 대한 통합시스템을 구축하였다. 한편 내수침수에 관한 연구로는 원성연 등(1993)이 ILLUDAS를 이용하여 도시구역의 유출량에 대한 연구를 하였으며, 유재홍 등(2005)은 하천모형과 우수관망모형을 결합한 내외수 연계모형을 개발하여 홍수범람모의를 하였다.

일반적으로 수치모형을 이용하여 대상영역을 모의하는 경우, 국부적인 지형 특성을 고려하고 제내지의 해상도를 높이기 위해서는 효율적이고 상세한 격자 생성 기술이 요구된다. 균일격자로 이루어진 수치모형은 하천흐름 및 범람에서의 복잡한 현상과 적합하지 않으며, 홍수의 범람 및 침수와 같이 고해상도의 해를 요구하는 경우에는 매우 비효율적이다. 따라서 상대적으로 관심이 적은 지역에서는 상세한 격자 및 계산이 필요 없는 반면, 홍수로 인한 피해가 예상되는 관심 지역에 있어서는 국부적인 격자의 세밀화를 통한 고해상도의 수치계산이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 제내지를 관심영역으로 선택하고 계층적 구조의 사면구조(hierarchical quadtree)를 적용하여 세분화된 격자를 구성하였다. 또한 홍수범람의 제내지 이동을 모의할 수 있도록 균일 격자에 사용 가능한 기존의 이동경계기법(조용식, 1996)을 확장하여, 계층적 구조의 사면구조(hierarchical quadtree) 격자에서도 적용 가능한 이동경계 기법을 개발하였다. 이 기법은 정사지형을 계단지형으로 단순화하여 모든 지형 변화에 적용할 수 있게 하였다. 개발된 본 모형을 검증하기 위해 바다마찰이 없는 타원형 수조에서 유체의 주기적인 거동을 수치 해석하여 균일 격자를 사용한 기존 결과 및 해석해와 비교 검증한 후, 경상남도 의령지역에 본 모형을 적용하였다. 각각의 빈도에 따른 수치해석 결과를 제시하였고 홍수범람 지역을 예측하여 홍수발생시 발생하는 피해를 최소화할 수 있도록 하였다.

2. 사면구조 격자 기법

계층적 구조의 사면구조 격자는 다음과 같은 방법으로 생성된다.

- ① 관심 대상영역을 단위길이의 큰 정사각형에 규격화시킨다.
- ② 단위 길이의 큰 정사각형을 4개의 작은 정사각형으로 분할한다.
- ③ 정사각형 한 개에 씨앗점이 하나만 포함하게 될 때까지

각각의 격자는 반복적으로 분할한다.

- ④ 분할 과정에서 이웃하는 정사각형간의 길이비는 2:1의 비율을 유지하도록 인접 격자들은 조건에 맞도록 자동적으로 더욱 분할된다.

본 프로그램 내에서 씨앗점이란 격자의 분할 여부를 판단하는 기준으로, 전체 영역 중에서 상세화하기를 원하는 지역에 임의적으로 씨앗점을 생성하여 분할할 수 있다. 한편, 분할 과정에서 2:1의 비율을 유지하는 것은 발생가능한 수치적 오차를 최소화하고 보존법칙을 정확하게 유지할 수 있다(Park, 1999).

생성된 사면구조격자에서, 각각의 격자를 정의하거나 인접한 격자에 대한 정보를 얻기 위해서 연결법(linked list), 이진법(binary system), 관련법(reference system)과 같은 여러 격자 체계 방법들이 연구되어져왔다. 위 3가지 방법 중에서 연결법(linked list) 방법이 가장 효율적인 것으로 알려져 있으며, 따라서 본 연구에서는 이 방법을 사용하였다(Yiu, 1996). 본 모형에서 모든 격자는 기억 지시자(pointer)에 의해 저장되고 뿌리(root) 격자까지의 경로에 대한 정보가 정의되어 있다. 각각의 격자는 계통도 내에서의 절점, 모서리 수, 격자의 고유번호를 기억장소에 보관한다. 좀 더 자세한 설명은 Yiu(1996), Park(1999), Kim(2007)의 논문을 참고할 수 있다.

3. 지배방정식과 수치모형

본 연구에서는 홍수파의 파장이 길고 연직방향의 가속도성분이 상대적으로 매우 작을 경우, 3차원 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식을 수심방향으로 적분하여 얻어지는 2차원 Saint Venant 방정식을 이용하여 2차원 수치모형을 개발하였다. 비보존형 방정식은 치분화하면 보존법칙을 만족할 수 없어 계산과정에서 발생하는 오차가 누적되면 상당한 계산오차를 가져올 수 있으므로 본 모형에서는 다음과 같은 보존형 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{h} \right) + gh \frac{\partial h}{\partial x} = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{h} \right) + gh \frac{\partial h}{\partial x} = gh(S_{0y} - S_{fy}) \quad (3)$$

식 (1-3)에서 h 는 수심, u 와 v 는 x 축과 y 축 방향의 수심평균 유속이며, g 는 중력가속도, S_0 는 하상경사, S_f 는 마찰경사이다. 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. 운동량방정식의 오른쪽에 포함된 마찰경사는 Manning 공식을 이용하여 식 (4-5)와 같이 나타낼 수 있다.

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

$$S_{fj} = \frac{gn^2}{h^{4/3}} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

본 연구에서는 양해법의 일종인 leap-frog 기법과 운동량방정식에 포함된 비선형항의 정확도를 향상시키기 위하여 1차 정확도를 갖는 풍상차분기법(upwind scheme)을 사용하였다(인태훈, 2003). Leap-frog 기법은 간단한 형태의 2차 정확도 중앙차분 기법으로서, CFL조건을 만족하는 경우에 파동의 이동에 대한 수치해석에서 우수한 결과를 제공한다. 그리고 경계조건의 설정 및 계산상의 편의를 위하여 변수 h, P, Q 의 계산점을 겹치지 않도록 엇갈림 격자(staggered mesh in time and space)를 사용하였다. 한편 차분식에서 나타나는 중간격자 값들과 동서남북의 위치의 격자 값들은 9개의 형상(Topology)을 고려하여 선형 보간하여 계산하였다.

4. 수치모델의 검증

사면구조 격자를 사용한 수치 모형의 이동 경계에 대한 정확성 및 적용성을 검증하기 위하여 해석해가 있는 문제(Thacker, 1981)에 수치모형을 적용하고 그 결과를 비교 분석하였다. 본 문제는 그림 1과 같은 포물형 수조 위의 중심부에 포물선형 수면현상이 초기조건으로 주어지는 경우 유체의 거동을 묘사하는 문제로서, 수면이 진동하여 경사면을 따라 처오름과 처내림 현상이 주기적으로 반복되는 것을 해석한다.

본 연구의 수치모의에서는 $=2000m, =2500m, =1.0m$ 을 사용하였으며, 포물형 수조의 형상은 식 (4)과 같이 표현되고, 자유수면 변위에 대한 해석해는 식 (5)과 같이 계산된다.

$$h = h_o \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right) \quad (4)$$

$$\zeta = h_o \left[\frac{\sqrt{1-A^2}}{1-A \cos \omega t} - 1 - \frac{r^2}{a^2} \left\{ \frac{1-A^2}{(1-A \cos \omega t)^2} - 1 \right\} \right] \quad (5)$$

여기서 $\omega = \frac{1}{a} \sqrt{8gh_0}$, $A = \frac{a^4 - r_0^4}{a^4 + r_0^4}$, 이다.

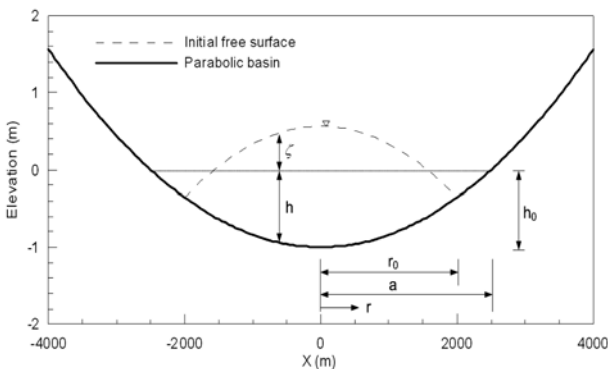


그림 1. 수조가 초기 수면 모식도

그림 2는 본 모의에서 사용된 사면구조 격자를 나타낸 것이다. 수면의 처오름과 처내림이 반복되는 구간에 씨앗점을 생성하여 세분화하였고, 그 결과 최소격자 크기는 7.8125 m, 최대격자 크기는 500 m을 갖는 사면구조 격자를 생성하였다. 램 1.0 GB, 펜티엄 3.0 GHz를 갖는 개인용 컴퓨터에서, 같은 크기의 최소격자를 갖는 균일 격자 모델과 비교하였을 때 효율성 측면에서 약 4배정도 향상됨을 표 1에서 보듯이 알 수 있다.

모의 결과, 그림 3은 모의시작 후 주기에 따른 자유수면 변위를 각각의 주기에 따라 도시한 것이고, 그림 4는 수조 중심으로부터 거리가 각각 0km와 1km인 지점에서의 시간에 따른 자유수면 변위를 도시한 것으로 해석해와 잘 일치하며, 균일격자를 사용한 Cho(1996)의 결과보다 개선되고 있음을 보여준다. 이는 Cho의 수치 모의에서 12.5m의 격자를 사용한 반면에, 본 사면구조 격자에서는 7.8125m의 세밀한 격자를 사용하였기 때문인 것으로 생각된다.

5. 수치모델의 적용

본 연구의 대상영역으로는 경상남도 의령군 의령읍과 함안군 범수면을 통과하고, 349의 유역면적과 189의 유로연장을 갖는 남강 유역을 선택하였다. 대상 유역은 근처에 남강과 낙동강이 흐르고 있고, 이들 두 강의 작은 경사로 인한 느린 유속 때문에 큰 비만 오면 남강과 낙동강의 수위가 급격히 높아지는 지형적 특성을 갖는다. 이로 인해 이 지역은 남쪽에서 북쪽으로 흐르는 하천수가 잘 배수되지 못하고 역류하는 현상이 자주 나타나며, 저지대에서는 상습적인 홍수피해가 발생하였다.

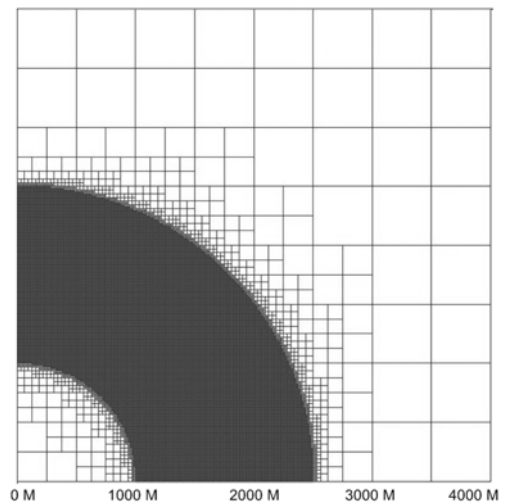


그림 2. 사용된 사면구조 격자

표 1. 격자수 및 실행시간 비교

	균일격자	사면구조격자	비율
격자크기	7.8125 m	7.8125 ~ 500 m	-
격자수	262144	69244	26.4%
실행시간(1주기)	11 min	3 min	27.3%

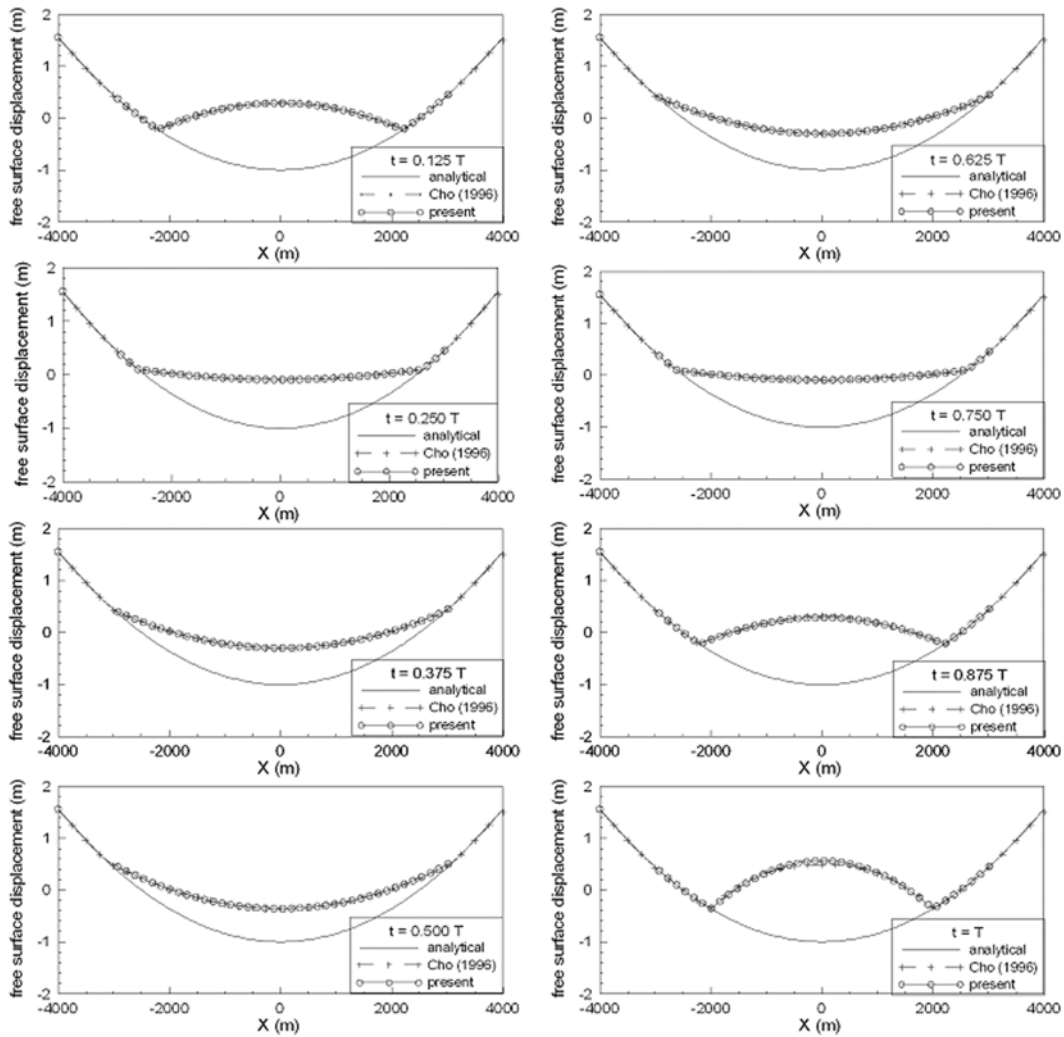


그림 3. 각 주기에서의 자유수면 변위

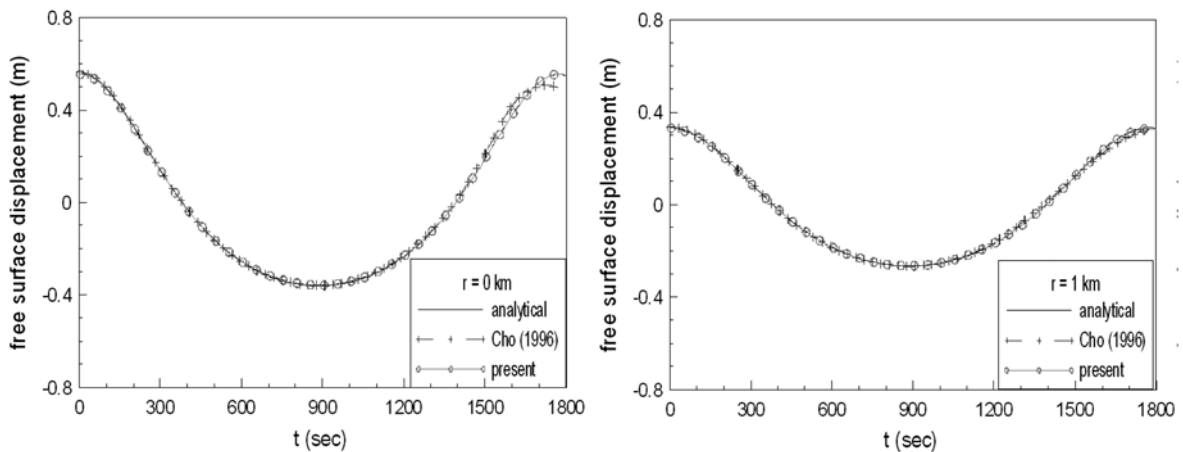


그림 4. 시간의 경과에 따른 자유수면 변위

의령지역의 상습적인 홍수범람을 예측하고 홍수피해를 저감시키기 위해서 우리는 제외지나 산간지역보다는 홍수범람 가능성이 높은 제내지에 관심을 가져야 한다. 제내지에서 작은 격자를 사용하는 것은 계산시간에 있어서 효율적일뿐만 아니라 해상도도 높일 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 범람 위험성이 있는 저지대를 미리 예측하고, 그 저지대를

따라 씨앗점을 생성하여 세밀한 격자구조를 갖도록 하였다. 모든 격자가 2:1의 보존 법칙을 만족하면서 각 격자에 한 개의 씨앗 점을 포함할 때까지 분할되어, 22.168 m과 177.344 m의 최소·최대격자를 갖고 22486개의 면을 포함하는 사면구조 격자를 생성하였다(그림 6).

4.1 경계조건 및 초기조건

본 연구에서는 남강 본류와 의령천을 중심으로 모형을 구성하고 수문조건을 이용하여 모의하였다. 모형 구성시 남강으로 유입되는 상류 경계조건은 강우 유출 모형으로부터 유도된 유량수문곡선을 적용하였으며, 하류 경계조건은 수위를 경계조건으로 적용하였다. 또한 의령천 등의 지류는 시간에 따른 홍수량으로 지배방정식 내에 생성항 처리하여 실제 현상을 모의하였고, 조도계수로는 토지 이용 현황에 관한 자료가 미비한 관계로 전 유역에 걸쳐 0.023을 가정하여 모의하였다.

제방이 붕괴하는 경우 제방고는 주변 제내지의 지반고와 같다고 가정하였고, 수렴속도를 빠르게 하고 초기에 발생하는 진동을 억제하고자 초기조건을 수위가 10 m인 경우로 가정하여 모의하였다. 모형에 적용된 수문곡선들은 그림 7에서 그림 9까지에서 보듯이, 50년, 100년, 200년과 500년의 수문빈도를 갖으며, 그 각각의 빈도에 따라 수치 모의하여 결과를 비교할 수 있게 하였다. 빈도별 남강의 상류 및 하류 경계조건과 의령천의 상류 경계조건을 그림 7에서 그림 9까지에 나타내었다.

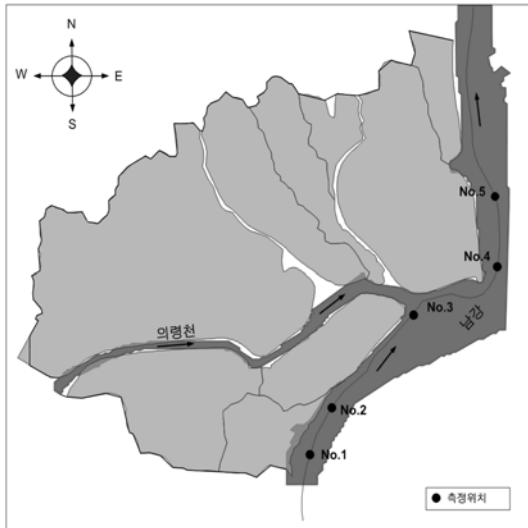


그림 5. 대상지역 및 측정위치

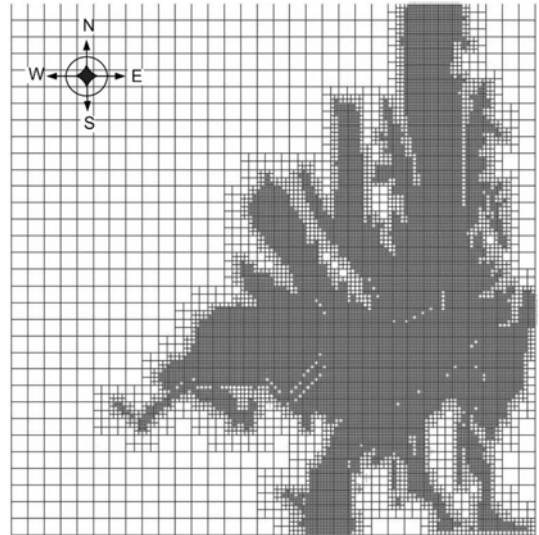


그림 6. 분할된 사면구조격자

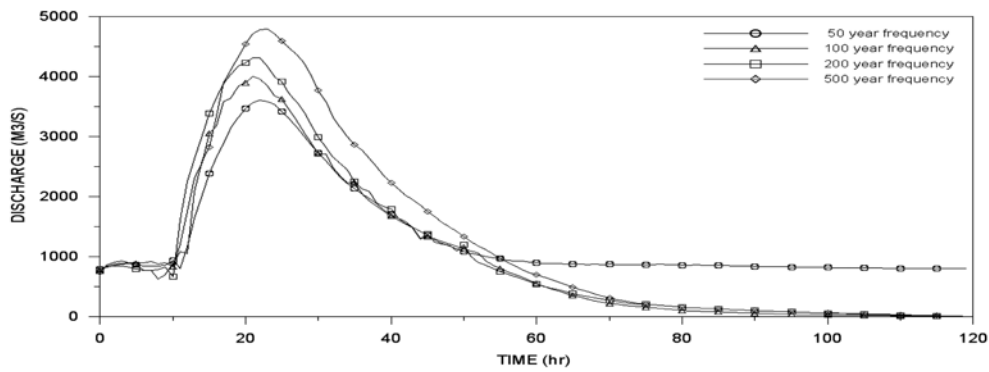


그림 7. 빈도별 남강 상류 경계조건

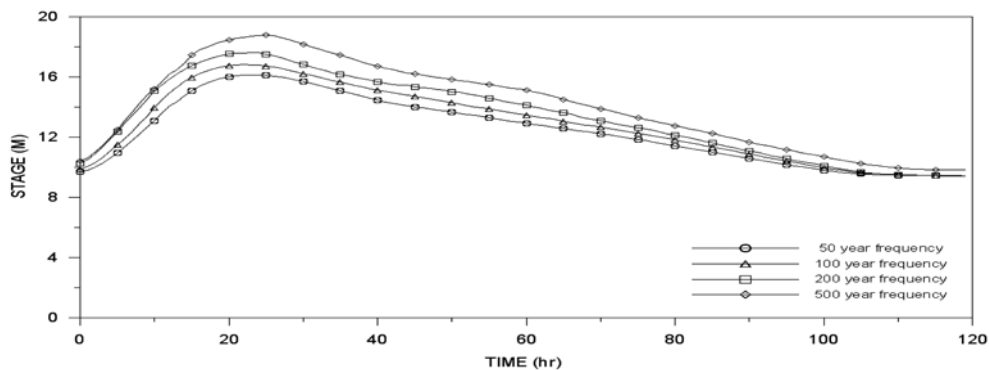


그림 8. 빈도별 남강 하류 경계조건

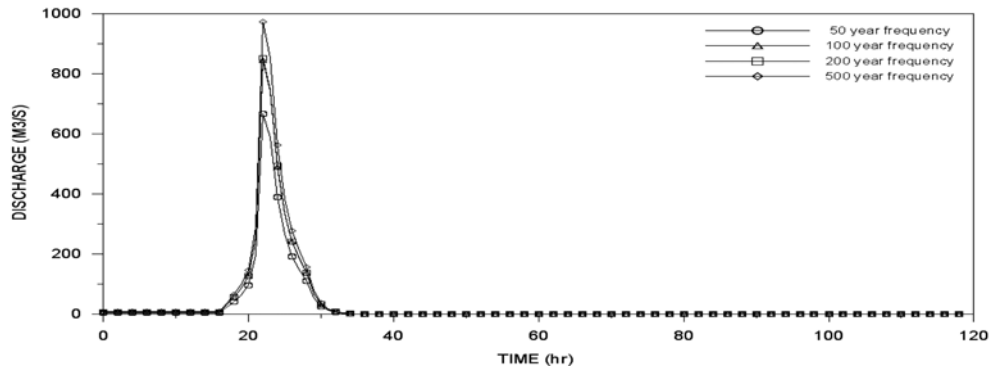


그림 9. 빈도별 의령천 상류 경계조건

4.2 빈도별 범람 모의 비교

그림 10에서 그림 14는 그림 7에서 그림 9까지에 도시한 빈도별 경계조건에 따른 홍수위의 변화를 각각 상류부에서

하류부까지의 제외지에서 비교한 것이다. 빈도가 증가함에 따라 첨두수위 및 시간별 홍수위가 커지고 있는 일반적인 현상을 보이고 있다. 실제 의령지역에서의 제방 높이는 대략

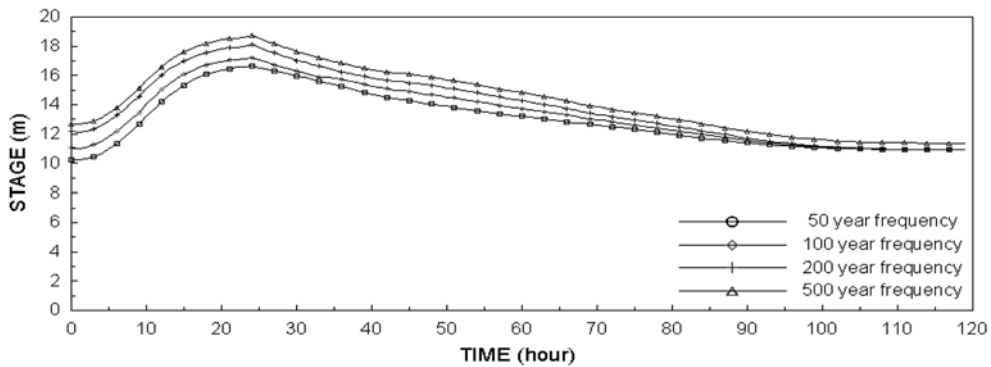


그림 10. No. 10에서의 빈도별 수위수문곡선

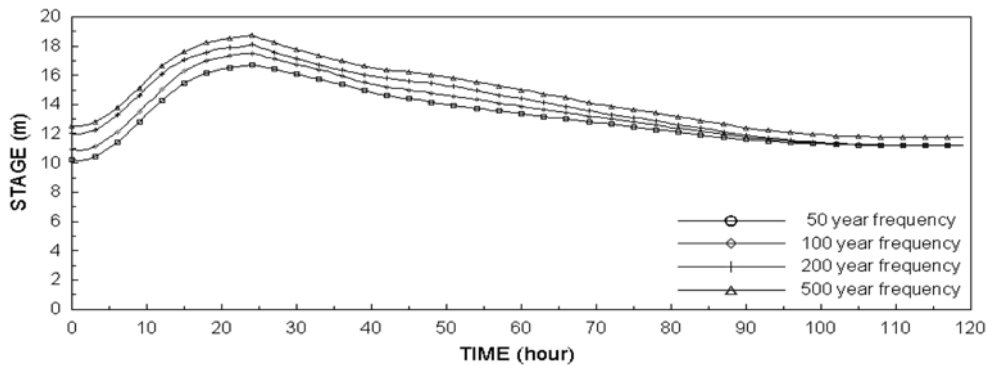


그림 11. No. 20에서의 빈도별 수위수문곡선

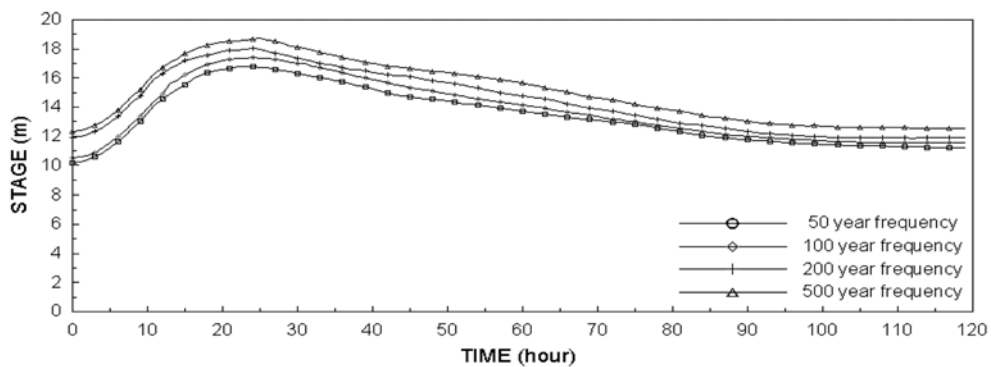


그림 12. No. 30에서의 빈도별 수위수문곡선

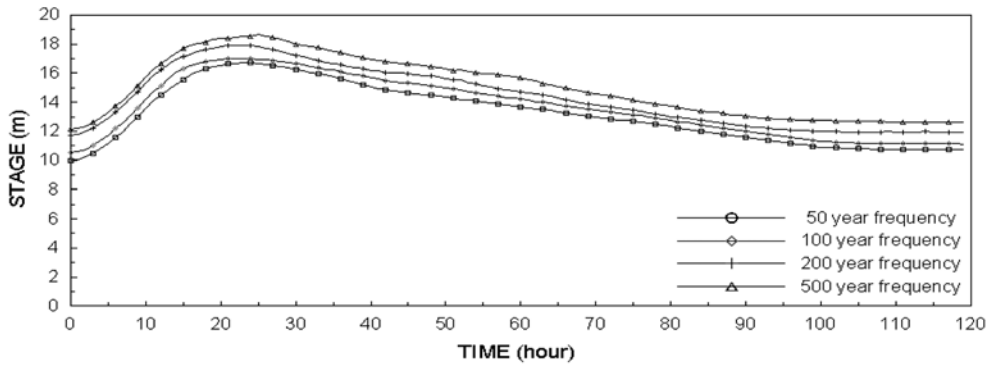


그림 13. No. 4에서의 빈도별 수위수문곡선

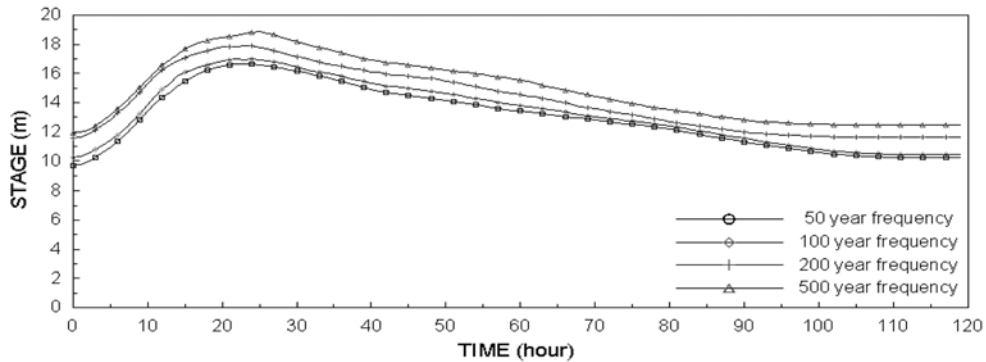


그림 14. No. 5에서의 빈도별 수위수문곡선

18.5m 정도에서 형성되어 있으므로, 최대 홍수위가 제방의 설계고보다 넘는 500년 빈도에서 제내지로 홍수가 범람될 것임을 예상할 수 있다(표 2). 모의시작 후 24시간 부근에서 최대 홍수범람을 보이며, 실제로 각 빈도별 홍수 범람도를 작성하여 보면, 50년 빈도부터 200년 빈도까지의 경계조건에 따른 수치 모의 결과는 제내지로 홍수가 범람되지 않는 것으로 나타났으며 따라서 이에 대한 피해도 매우 미미할 것으로 예상된다. 그러나 500년 빈도의 홍수량에서는 제외지의 수위가 제방고보다 상대적으로 높아 그림 15에서와 같이 제내지

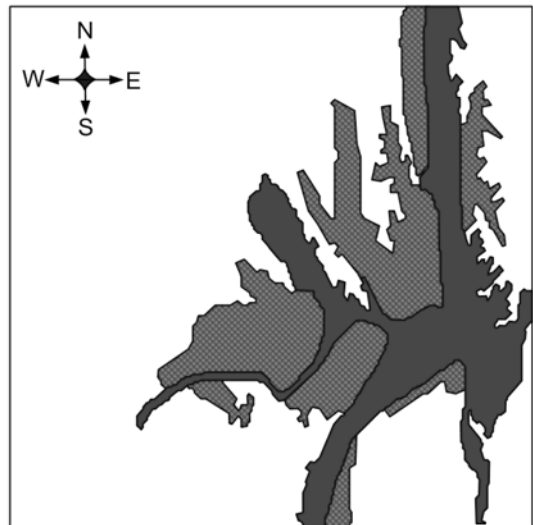


그림 15. 500년 빈도의 침수범람도

표 2. 각 측정점에서 빈도에 따른 최대 수위 비교

측점	50년 빈도	100년 빈도	200년 빈도	500년 빈도
1	16.68	17.19	18.08	18.72
2	16.73	17.47	18.09	18.74
3	16.81	17.41	18.01	18.75
4	16.73	17.01	17.94	18.66
5	16.63	16.95	17.92	18.87

표 3. 500년 빈도에서의 의령지구 범람 면적

위 치	침수심	침수면적 (km ²)
의령지구	0~2	4.18
	2~4	1.33
	4~6	1.09
	6~8	0.62
	8~10	0.55
전체 침수면적		7.77

로 범람하는 것으로 모의되었으며, 그 침수 면적을 계산하여 보면 7.77 km²으로 나타났다. 따라서 500년 빈도 이상 내지는 이상 기후로 인한 강우사상이 실제로 발생한다면 홍수 범람으로 인한 인명 및 재산 피해가 발생할 것으로 예측할 수 있으며 적절한 조치가 필요할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 사면구조 격자를 이용하여 자유수면을 갖는 수면진동 문제에 대해 검증한 후, 경상남도 의령지구에서의

참고문헌

홍수범람 모의에 적용하였다. 사면구조 격자의 생성은 삼각망 격자나 곡선형 격자의 생성보다 빠르고 용이하며, 실제 문제에 적용하였을 때 균일한 격자보다 거의 4배 정도 효율적으로 계산할 수 있었다. 다음으로 본 연구에서 개발한 수치 모형을 각 빈도에 따른 홍수 사상에 대하여 제내지로의 범람 유무를 알아보았다. 수치 모의 결과 200년 빈도에까지의 홍수 사상에서는 기존의 제방이 홍수를 적절하게 방어하고 있음을 알 수 있었으나, 500년 빈도 이상에서는 제방보다 최대 홍수위가 더 높아져 제내지로 약 7.77 km² 면적이 제방을 월류하여 범람하였음을 알 수 있었다. 이와 같은 홍수범람으로 인해 인명 및 재산 피해가 예상되므로, 이에 대한 보다 구체적인 홍수피해 대책을 계획 및 수립하고 실행함이 요구 될 것으로 사료된다.

이번 연구에서는 해석해가 있는 자유수면 진동 문제에 적용하여 본 모형의 타당성을 검토하였으며, 사면구조 격자를 제내지 전체로 확대하여 좀 더 효율적이고 해상도 높은 격자를 형성하였다. 하지만 본 연구에서의 격자는 모의 초기에서부터 종료 시점까지 동일한 격자를 사용하여 홍수파의 전달과는 상관없이 생성되는 부분이 있었다. 따라서 앞으로의 연구에서는 고정된 사면구조 격자가 아닌, 홍수파의 진행에 따라 사면구조 격자도 같이 움직이는 이동 사면구조 격자를 생성하여, 계산에 있어 정확성을 높이고 모의 시간에 있어 효율성을 높일 수 있도록 해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2005년도 건설기술기반구축사업 (05-기반구축-D03-01)에 의한 이상기후대비시설기준강화 연구단의 연구 성과입니다.

- 김중호, 김형준, 이승오, 조용식 (2007) 사면구조 격자를 이용한 홍수범람모의. **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제7권, 제2호, pp. 45-52.
- 배용훈, 고덕구, 조용식 (2005) FLUMEN 모형을 이용한 홍수범람모의. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제5호, pp. 355-364.
- 소방방재청 (2007) 2007년도 주요 통계 및 자료.
- 이주현, 최종진, 이희철, 이은태 (2003) 고해상도 수치고도모형을 활용한 홍수범람도의 작성. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제23권, 제6B호, pp. 471-478.
- 인태훈, 박구용, 조용식 (2003) Quadtree 격자를 이용한 근해지진해일의 치오름높이 계산. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제4호, pp. 693-701.
- 유재홍, 김형준, 조용식 (2005) 홍수범람모의를 위한 내외수 연계 모형 개발. **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제5권, 제4호, pp. 1-8.
- 원성연, 윤용남 (1993) 도시유역의 홍수량 산정을 위한 도시유출 모형 연구. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제13권, 제5호, pp. 135-146.
- 조용식, 윤태훈 (1996) 경사 지형에서의 이동경계조건. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제16권, pp. 73-81.
- 최규현, 한건연 (2005) 댐 붕괴 해석을 위한 2차원 홍수범람모형의 개발: 2. 적용 예. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제2B호, pp. 143-149.
- 최규현, 한건연, 김상호, 이창희 (2006) 레이더 정량강우와 연계한 홍수유출 및 범람해석 시스템 확립 III. 2차원 홍수범람모의. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제4호, pp. 347-362.
- Park, K.-Y., (1999) *Quadtree grid numerical model of nearshore wave-current interaction*, Ph. D. dissertation, Oxford University.
- Thacker, W.C., (1981) Some exact solutions to the nonlinear shallow water wave equations. *J. Fluid mechanics*, Vol. 107, pp. 499-508.
- Yiu, K.F.C., Greaves, D.M., Cruz, S., Saalehi, A. and Borthwick, A.G.L., (1996) Quadtree grid generation : information handling, boundary fitting and cfd applications. *Computers and fluids*. Vol. 25, pp. 759-769.

- ◎ 논문접수일 : 2008년 02월 18일
◎ 심사의뢰일 : 2008년 02월 19일
◎ 심사완료일 : 2008년 04월 22일