재귀호출 알고리즘 기반의 홍수전파 특성 분석

The Analysis of Flood Propagation Characteristics using Recursive Call Algorithm

이 근 상* 장 영 운** 최 연 응***

Geun Sang Lee Young Wun Jang Yun Woong Choi

요 약 본 연구에서는 무주 남대천을 대상으로 재귀호출 알고리즘을 이용하여 제방 파제시 홍수위별 홍수전파 특성을 분석하였다. 먼저 병구보와 차산보를 파제 지점으로 설정하여 재귀호출 알고리즘에 의한 홍수위별 홍수전파 차수를 분석하였으며, 홍수전파 차수별 격자수와 누계 침수면적을 계산하였다. 또한 홍수전파 차수와 DEM 격자크기를 기준으로 홍수위별로 홍수가 전파되는 시간을 계산하였다. 재귀호출 알고리즘에 의한 홍수전파 차수의 분포특성을 통해 홍수 전파 과정을 파악할 수 있었으며, 홍수전파 차수별 누계 침수면적 그래프의 기울기 패턴을 통해 홍수에 취약한 지역을 선정함으로써 수재해 업무에 기초자료로 제공할 수 있었다. 또한 홍수위별로 홍수전파 시간을 계산함으로써 홍수시 주민들의 대피경로 및 대피시간과 같은 계획을 수립하는데 매우 효과적인 정보를 제공해 줄 수 있을 것으로 판단된다.

키워드 : 재귀호출 알고리즘, 홍수전파, 격자, 수재해

Abstract This paper analyzed the flood propagation characteristics of each flood elevation due to failure of embankment in Muju Namdae Stream using recursive call algorithm. A flood propagation order by the flood elevation was estimated by setting destruction point at Beonggu and Chasan small dam through recursive call algorithm and then, the number of grids of each flood propagation order and accumulated inundation area were calculated. Based on the flood propagation order and the grid size of DEM, flood propagation time could be predicted each flood elevation. As a result, the study could identify the process of flood propagation through distribution characteristic of the flood propagation order obtained from recursive call algorithm, and could provide basic data for protection from flood disaster by selecting the flood vulnerable area through the gradient pattern of the graph for accumulated inundation area each flood propagation order. In addition, the prediction of the flood propagation time for each flood water level using this algorithm helped provide valuable information to calculate the evacuation path and time during the flood season by predicting the flood propagation time of each flood water level.

Keywords : Recursive Call Algorithm, Flood Propagation, Grid, Flood Disaster

1. 서 론

여름철 장마기간을 중심으로 발생했던 홍수피해 특성이 최근에는 국지성 폭우의 등장과 함께 그 시기와 규모를 예측하기 어려운 수준까지 이르고 있다. 이로 인해 발생하는 홍수는 많은 인명과 재산피해를 발생시키게 되며, 이로 인해 매년 반복되는 수재해 발생 지역에서는 많은 경제적 피해와 함께 생명과 생활터

전을 빼앗길 수 있다는 심리적인 불안감까지도 함께 겪고 있는 상황이다[11, 13]. 따라서 국가의 경제적 손실을 줄이고 국민생활의 안정을 도모하기 위해서는 각종 재해대책과 치수계획 수립 시에 홍수위험지역에 대한 범람예측 정보가 필요하다[5, 8, 12].

최근 환경보호 측면의 여론에 의해, 제방축조 및 댐 건설과 같은 수재해 저감을 위한 대책들이 어려움에 있으며, 이러한 치수 시설물 역시 설계빈도를 초과하

[†] This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology(2013020289)

* Geun Sang Lee, Assistant Professor, Dept. of Cadastre & Real Estate, Vision University College of Jeonju. gslee@jvision.ac.kr

** Young Wun Jang, Samah Aerial Survey Co. Ltd., ywjang@samah.com

*** Yun Woong Choi, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Chosun College of Science & Technology, ywchoi@cst.ac.kr(Corresponding Author)

는 강우사상에 대해서는 한계성을 가지는 것이 사실이다. 이러한 부분을 개선하고자 건설교통부-한국수자원공사에서는 수계별 댐군 홍수조절 연계운영시스템을 구축하여 기존댐들을 연계한 홍수분석능력 향상, 댐 상하류 홍수분석체계 일원화 및 유역단위의 물 관리체계 기반을 구축한 바 있다[13].

강우발생에 따른 침수 예측을 위해 다양한 모델들이 개발되었으며, HEC-RAS와 같은 1차원 수리해석 모델을 비롯하여 제방월류 및 파제를 고려한 제내지의 침수확산 등을 모의할 수 있는 FLUMEN (FLUvial Modeling Engine) 과 같은 2차원 모델도 있다[4]. 특히 최근에는 GIS 공간정보인 DEM (Digital Elevation Model)과 하천내 횡단측량성과물을 연계한 정밀지형 자료를 홍수범람모의에 활용함으로써 보다 정확한 침수해석이 가능해지고 있다[9].

홍수범람 모의와 관련된 연구를 살펴보면, Chen과 Hill[4]은 침수위험을 모의 하는데 DEM 해상도의 영향을 분석하였으며, Horritt와 Bates[6]은 흐름해석을 모의시 GIS 격자자료의 공간해상도에 따른 영향 특성을 해석하였다. 또한 Jian 외[9]는 GIS 기반의 도시홍수범람모델인 GUFIM(GIS-based urban flood inundation model)을 이용하여 침수모의를 실시하였으며, Brett[3]는 LiDAR(Light Detection And Ranging)로 부터 얻어진 정밀 DEM과 온라인 상으로 제공되는 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DEM을 이용하여 홍수범람 모의를 수행함으로써 자료 활용 측면에서의 접근을 시도하였다. 국내 연구로서, 복정수[2]는 HEC-RAS와 FLUMEN 모형을 이용하여 감천 본류구간의 교량에 의한 수위 및 유속분포 비교 및 이에 의한 홍수범람의 영향을 모의한 바 있으며, 윤석화[15]는 FLUMEN 모형을 이용하여 군장지구 단지 개발에 따른 홍수범람 상황을 모의하였다. 또한 이근상과 최연웅[13]은 GIS 자료와 연계하여 FLUMEN 모형에 의한 홍수특성을 분석하여 침수심별로 제시하였다.

FLUMEN과 같은 2차원 홍수해석 모형은 월류 및 파제를 고려한 정밀 모의가 가능한 장점이 있지만, 지형자료를 비롯한 입력자료 구축 및 모델링에 많은 시간이 소요되는 단점이 있으며, 제내지로 유입되는 홍수량을 사전에 계산하여 입력해주어야 하는 제약이 따른다. 제방이 붕괴되는 파제 시나리오의 경우 의사결정자는 특정 홍수위로 하천의 홍수가 제내지로 유입될 경우 어느 경로를 따라 어디까지 이동하는지에 대한 정보가 매우 중요하며 특히 최종적으로 홍수가 전파되는데 소요되는 시간도 인명대피 등의 측면에서 매우 중요하다. HEC-RAS와 같은 1차원 수리해석 모형의 경우도 지형자료 구축 및 입력조건에 많은 제약

이 따르고, 홍수로 인한 침수지역 결과도면만 제시되므로 물의 흐름이 단계적으로 어떻게 전파되는지에 대한 모니터링이 어렵고 아울러 홍수가 최종 지점까지 전파되는데 소요되는 시간을 계산하지는 못한다.

본 연구에서는 홍수시 파제로 인해 하천의 홍수가 다량으로 제내지에 유입되었을 경우, DEM 자료만으로 홍수가 어떤 경로로 순차적으로 전파되는지에 대한 분석을 수행하고자 반복적인 계산과정을 지원하는 재귀호출 알고리즘을 이용하였다. 특히 홍수 전파 특성은 지형적인 특성에 많이 좌우되므로, 하천의 좌안과 우안의 특성이 서로 다른 지역을 선정하여 파제시 홍수위에 따라 물의 흐름이 이동되는 경로를 추적하여 홍수전파 차수를 계산하였다. 그리고 홍수위별 홍수전파 차수에 대한 격자수를 계산하여 홍수전파 차수별로 홍수가 전파되는 특성을 분석하였으며 이를 대상지역의 지형자료와 연계하여 해석하였다. 또한 홍수위별로 홍수전파 차수에 따른 누계 침수지역 면적을 계산하였으며, 홍수전파 차수 구간에 따른 누계 침수면적의 경사를 평가하여 대상지역의 지형적인 특징과 연계하여 해석하였다. 이러한 홍수전파 특성을 분석한 자료는 홍수시 인명피해가 크게 발생할 수 있는 위험구간을 효과적으로 선정하는데 중요한 자료가 된다. 또한 본 연구에서는 홍수전파 차수와 격자크기를 이용하여 홍수 전파 시간을 계산함으로써 위급한 상황시 신속한 대피 경로 설정 및 대피 시간 계산 등과 같은 수재해 관련 업무에 필요한 의사결정 자료를 효과적으로 생성하도록 하였다. 이와 같이 본 연구에서는 기존 침수해석 모델의 경우 자료구축에 많은 시간과 사전정보가 요구되는 제약사항을 개선하고자 DEM 자료로부터 사용자가 침수심 정보를 간단하게 입력할 경우 홍수가 전파되는 차수와 방향 그리고 전파시간을 신속하게 평가할 수 있는 기법을 개발하는데 목적을 두었다.

2. 재귀호출 알고리즘 개념과 홍수전파

재귀호출 알고리즘이란 자신을 호출(recursive call)하는 기법으로 문제를 작은 문제로 분해하여 해결하는 강력한 문제해결 방법이다. 문제를 분할하였을 때 작은 문제가 원래의 문제와 동일하면 재귀호출 알고리즘을 사용하여 해결 할 수 있다.

재귀 호출(recursive call)은 크게 자기 자신을 바로 호출하는 직접 재귀와 둘 이상의 메소드 호출이 처음 호출한 메소드로 되돌아오는 간접 재귀로 나눌 수 있다. 모든 재귀호출 알고리즘은 반복상태 (recursive case)와 기저상태(base case)로 구분된다. 반복상태는 자신의 메소드를 다시 작은 부분으로 호출하는 일반

적인 경우이고, 기저상태는 프로그램을 종료하기 위한 해결방안을 정의한 경우이다. 일반적으로 재귀 호출 기법에 의하여 해결되는 문제는 반복기법으로도 해결 할 수 있으며 재귀호출 함수가 프로그램 내에서 실행되기 위해서는 메모리의 스택 공간을 사용하게 되는데 기저상태에 도달할 때 까지 계속 함수 호출이 일어나야하기 때문에 스택의 공간을 낭비하게 되며 동일한 과정을 불필요하게 두 번 이상 호출해야 하는 경우가 발생하기 때문에 효율적인 측면에서는 반복기법이 우수하다. 하지만 반복문을 사용하여 쉽게 해결하지 못하는 경우 재귀호출 기법을 사용하여 편리하게 해결 되는 경우가 있기 때문에 메모리 공간을 크게 고려해야 하지 않는 경우라면 재귀호출 기법을 사용하는 것이 도움이 될 수 있다[1, 14].

DEM 자료를 기반으로 홍수가 전파되는 기법을 아래와 같이 정리하였다.

먼저 유역내의 유체의 흐름이 정상(steady)상태의 흐름이면 유하 시간은 단순히 임의 구간 내에서 다음과 같이 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$t_t = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{V} dx \quad (1)$$

여기서 t_t 는 유하시간, x 는 유체의 이동거리, V 는 유속이다.

식 (1)의 유속은 Manning의 조도계수, 도수반경 그리고 수면경사 식을 이용하여 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서 n 은 조도계수, R 은 동수반경, S 는 수면경사이다.

식 (2)에서 동수반경은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$R = \frac{A}{P} \quad (3)$$

여기서 A 는 유수의 단면적, P 는 윤변이다.

또한 유수의 단면적은 유량과의 관계에서 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \frac{Q}{V} \quad (4)$$

여기서 Q 는 유량이다.

식 (4)를 식 (3)에 대입하여 정리하면 식 (5)와 같이 정리할 수 있다.

$$R = \frac{Q}{PV} \quad (5)$$

이 식을 Manning의 공식에 대입하고 유속에 관한 식으로 정리하면 식 (6)과 같다.

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{n} \left(\frac{Q}{PV} \right)^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} = \frac{S^{\frac{3}{10}} Q^{\frac{2}{5}}}{n^{\frac{3}{5}} P^{\frac{2}{5}}} \quad (6)$$

식 (6)을 정상상태에서의 유하시간에 관한 공식에 대입하면 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$t_t = \int_{x_1}^{x_2} \frac{n^{\frac{3}{5}} P^{\frac{2}{5}}}{S^{\frac{3}{10}} Q^{\frac{2}{5}}} dx \quad (7)$$

식 (7)은 일반적인 정상상태에서의 유속을 가진 유체가 임의의 구간에서 이동하는데 걸린 시간이며 유하시간의 일반적인 표현을 나타낸 것이라 할 수 있다 [10].

특정지역에서 유입된 물의 흐름을 격자자료 형태인 DEM에 맞추어 그 흐름을 분석할 경우 유하시간에 관한 공식에서 유량이 매우 많고 일정하다고 가정할 경우 흐름이 있는 경계면의 거친 정도를 나타내는 계수인 조도계수 n 의 영향은 거의 동일할 것이며 유량 Q 에 대하여 동일한 값이 적용된다. 또한 지표면에서의 흐름이기 때문에 수로에 있어서 흐르는 물과 수로 측면 및 바닥이 접하는 부분을 흐름과 직각인 평면상에서 측정한 길이인 윤변은 언제나 하나의 격자 크기로 동일하게 적용된다. 따라서 유하시간에 대한 공식의 변화 요소는 경사도라고 말할 수 있다. 따라서 물이 유입된 현재 격자를 기준으로 주변 지역에 대하여 물의 흐름이 가능한지 경사도 분석을 수행하게 되며, 그렇게 해서 다른 격자로 물이 유입된 경우에도 해당 격자를 기준으로 역시 주변 격자들에 대한 경사도 분석을 수행하여 물의 흐름을 계산하게 된다.

이러한 형태로 경사도에 관한 작은 문제로 물의 흐름을 정리하여 재귀호출 알고리즘에 적용할 수 있다. 먼저 특정 지역에서 월류나 파제가 발생하였다고 할 때 해당 격자로 일정량의 많은 물이 지속적으로 유입된다고 가정하면 그 유량은 주변의 격자중 물이 유입된 지역을 제외한 3개 격자에 대해 경사 분석을 통해

물의 흐름을 결정하게 된다. 물의 흐름이 결정되면 다시 물이 도착한 격자에 대해 동일하게 주변의 격자에 대해서 경사 분석을 통해 물의 흐름을 결정하는 과정을 반복 수행하게 되는 것이다.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	35	12	11	11	10	10	9.8	10	10	11
2	35	13	12	13	45	45	45	42	42	13
3	35	14	15	15	45	45	45	42	42	15
4	35	16	17	18	45	45	45	42	42	17
5	30	17	19	22	22	22	22	21	20	18
6	35	17	21	23	24	24	23	22	20	21
7	35	17	21	23	25	25	24	23	19	22
8	35	17	20	22	24	23	19	17	19	21
9	35	18	18	20	21	21	20	17	18	21
10	35	19	20	20	20	20	21	20	20	21

(a) the first order flood propagation process

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	35	12	11	11	10	10	9.8	10	10	11
2	35	13	12	13	45	45	45	42	42	13
3	35	14	15	15	45	45	45	42	42	15
4	35	16	17	18	45	45	45	42	42	17
5	30	17	19	22	22	22	22	21	20	18
6	35	17	21	23	24	24	23	22	20	21
7	35	17	21	23	25	25	24	23	19	22
8	35	17	20	22	24	23	19	17	19	21
9	35	18	18	20	21	21	20	17	18	21
10	35	19	20	20	20	20	21	20	20	21

(b) the second order flood propagation process

Figure 1. flood propagation process

재귀호출 알고리즘에 의한 침수 전파 과정을 DEM 자료를 이용하여 설명하면 다음과 같다. Fig. 1(a)에서 각 격자의 값은 표고값을 의미하며, 만약 A5 격자가 제방의 파제 지점이라면 홍수시 하천의 유량이 파제 지점으로 집중하여 30m의 높이를 기준으로 B5 격자로 물이 지속적으로 유입하게 된다. B5 격자에 유입된 홍수는 먼저 주변 격자인 B4, C5, B6에 대해 경사 및 표고특성을 비교하여 홍수가 전파될 것인지를 계산하게 된다. Fig. 1(a)의 경우 홍수는 먼저 B5 보다 표고값이 낮은 B4로 하향 경사가 형성되어 우선적으로 유입되었지만, 홍수시 하천에서 다량으로 유입된 물의 표고값이 30m 이므로 이 보다 표고값이 낮은 C5와 B6 격자로도 홍수가 유입된다. 이와 같이 B4, C5, B6 세 격자에 유입된 홍수는 재귀호출 알고리즘 기초하여 반복적인 계산과정을 수행하게 된다. Fig. 1(b)는 B5에서 B4 격자로 유입된 홍수가 2차적으로 어떠한 형태로 전파되는지를 설명한 그림이다. B4 격

자로 유입된 홍수는 다시 경사도를 파악하기 위해 주변 A4, B3, C4 격자의 표고값과 비교하는 과정을 거치게 되며, B3와 C4는 최초 홍수 유입 표고값보다 낮기 때문에 홍수가 전파되지만 A4 격자의 표고값은 35m로서 최초 홍수 유입 표고값인 30m 보다 높기 때문에 홍수가 전파되지 않고 멈추게 된다.

Fig. 2는 Fig. 1에서 제시된 홍수 전파 과정을 재귀호출 알고리즘을 이용하여 6차까지 전파된 결과를 보여주고 있다. 이러한 홍수전파에 따른 차수 계산 결과는 지형특성에 따라 큰 영향을 받게 되며, 특히 완경사지역의 경우 홍수가 모든 방향에 대해 전파되므로 차수 구간별 홍수가 전파되는 격자의 수가 크게 증가하는 경향을 보이게 된다. 본 연구에서는 홍수기에 제방이 붕괴되는 파제 시나리오시 하천의 물이 다량으로 유입되는 조건에서 홍수가 표고값에 따라 동일한 속도로 전파되는 가정하에 분석이 수행되었다. 홍수기에는 물이 전파되는 속도가 보통 2~3m/s 정도로 매우 빠르며[16], 본 연구에서 제시한 재귀호출 알고리즘 기반의 홍수전파에 따른 차수 계산 결과를 통해 해당 지역의 홍수전파 속도를 간접적으로 계산할 수 있는 장점이 있다.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	35	5	6	11	10	10	9.8	10	10	11
2	35	4	5	6	45	45	45	42	42	13
3	35	3	4	5	45	45	45	42	42	15
4	35	2	3	4	45	45	45	42	42	17
5	30	1	2	3	4	5	6	21	20	18
6	35	2	3	4	5	6	23	22	20	21
7	35	3	4	5	6	25	24	23	19	22
8	35	4	5	6	24	23	19	17	19	21
9	35	5	6	20	21	21	20	17	18	21
10	35	6	20	20	20	20	21	20	20	21

Figure 2. order calculation due to flood propagation

3. 적용 및 분석 결과

3.1 연구대상지

본 연구에서는 재귀호출 알고리즘 기반의 침수 가시화 모의를 위해 전라북도 무주군 무주읍을 관통하는 남대천을 연구대상지로 선정하였다. 남대천의 상류부는 대체로 하상경사가 급하여 유속이 빠르고 산지 협곡부를 만곡하는 형상을 하고 있으며, 중하류부는 하천변에 농경지와 주거지가 분포하고 있어 하상경사가 비교적 완만하고 하폭도 넓은 형상을 가지고 있다. 또한, 하류부는 하도정비가 완료된 무주읍내 도심지를 관통

하고 있으며 하폭이 넓고 유량이 풍부한 하천이다. 홍수범람 모의를 위한 구간으로는 2001년 하천정비기본계획에서 측량한 No. 12~No. 24 범위로서, 도심지 구간인 무주읍을 관통하고 2001년도 무주읍 수해복구공사를 통해 제방 양안이 잘 정비되어 있다. 또한 하도내에는 무주교와 남대천교를 비롯하여 차산보, 병구보, 하리보가 위치하고 있다[7].

Figure 3. study area

3.2 지형자료 구축

재귀호출 알고리즘은 특정 격자에 유입된 홍수가 주변 격자들의 표고값을 비교하여 침수 가시화를 표출하는 방식이며, 홍수가 월류에 의한 홍수범람은 현실적으로 소량의 유량이 제내지로 유입되므로 재귀호출 알고리즘을 적용하여 침수 가시화를 표출하는 데에는 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 파제 시나리오에 한정하여 제방을 포함한 제내지 지역에 대해 재귀호출 알고리즘에 의한 침수 가시화를 시도하였다.

먼저 제내지의 지형은 1/5,000 수치지형도의 등고선 레이어를 이용하였으며, 제방은 하천정비기본계획에서 제시된 횡단측량 성과물을 이용하였다. 제내지의 등고선 레이어와 하천정비기본계획에서 제시된 제방의 횡단측량 성과물을 기반으로 불규칙삼각망(TIN; Triangle Irregular Network)을 생성하였으며, 제방의 선형 사상을 반영하기 위해 제방 선형 레이어를 breakline 으로 보간하여 처리하였다. 또한 재귀호출 알고리즘 적용을 위해 TIN 자료로부터 Fig. 4와 같이 5m 크기의 수치표고모형(DEM; Digital Elevation Model)을 구축하였다.

Fig. 4에서 좌안 제내지의 경우 제방 주변 지역이 전체적으로 평탄한 농경지로 구성되어 있으며(A1~A3), 따라서 파제로 인해 다량의 홍수가 유입될 경우 대상지의 제내지 하류부까지 물이 지속적으로 확산되는 특성을 갖게 된다. 반면, 우안 제내지 상류쪽인 무주읍 지역은 Fig. 4의 B 위치에 해당되며 표고값의 분포가 제방보다 상대적으로 높기 때문에 파제에 의

Figure 4. DEM data

한 침수 가능성이 상대적으로 낮고, 하류쪽인 Fig. 4의 C 지역은 표고값의 분포가 제방보다 상대적으로 낮기 때문에 파제에 의한 침수 가능성이 상대적으로 높은 특징이 있다. Fig. 4의 A1~A3은 홍수가 평야지역 특성상 하류로 지속적으로 전파되는 반면, Fig. 4의 C 지역의 경우는 주변 지역이 산으로 둘러 싸여 있기 때문에 파제시 유입된 홍수가 하류쪽으로 전파되지는 않는 것이 특징이다.

3.3 적용 및 결과분석

홍수시 제방이 붕괴되는 파제 지점을 보면 수압이 매우 높은 보 또는 교량 직 상류부에서 주로 발생하게 된다. 본 연구에서는 전라북도 무주군[7]의 무주남대천 하천정비기본계획보고서의 횡단측량 성과를 분석하였으며, 좌안 제내지의 경우 농경지 평탄지가 주로 분포하고 있으므로 극한 홍수에 따른 침수지역을 모의하기 위해 Fig. 3과 같이 병구보 주변을 파제 지점으로 선정하였다. 또한 우안 제내지는 상류 무주읍의 지형이 인근 제방보다 상대적으로 높기 때문에, 제방보다 상대적으로 표고값이 낮은 하류쪽의 침수 전파 특성을 살펴보기 위해 Fig. 3과 같이 차산보 주변을 파제 지점으로 선정하였다. 제방이 붕괴되어 홍수가 제내지로 전파되기 위해서는 좌우안의 파제지점 홍수위 선정이 중요하다. 본 연구에서는 좌우안 파제지점 주변의 제내지의 지형표고를 확인한 후, 해당 표고보다 1m 높은 표고값부터 홍수위를 지정하였다. 이를 통해 좌안의 홍수위는 EL. 186~189m, 우안의 홍수위는 EL. 183~186m 로 결정하여, 각 홍수위에 대한 재귀호출 알고리즘 기반의 홍수전파 특성을 모의하였다.

좌안 제내지의 침수 특성을 분석하기 위해, 병구보 주변의 지형을 편집하여 제방이 붕괴되도록 DEM 자료를 수정하였다. 수정된 DEM 자료를 기반으로 재귀호출 알고리즘을 이용하여 홍수위 186~189m 구간에 대해 홍수모의를 수행하여 Fig. 5와 같이 홍수전파 차수별 격자수를 계산하였다.

분석결과 홍수위 186~189m 구간에서 모두 최대

Figure 5. flood propagation order simulation result of each flood elevation for left levee inland

홍수전파 차수가 553차 까지 발생하였다. 대상지역내 좌안 제내지는 상류로부터 하류까지 농경지 형태의 평탄한 지형으로 구성되어 있어 병구보가 파제되어 다량의 홍수가 유입될 경우 하류방향으로 계속 전파 되어 최하단부까지 홍수가 도달하게 됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 좌안 제내지에 대한 홍수전파 차수별 격자수를 계산한 그래프이다. 파제지점을 중심으로 홍수

Figure 6. grids of each flood propagation order(left levee)

전파 초기 구간인 차수 50 미만 구간에서는 홍수위에 따른 홍수전파 차수별 격자수의 차이가 큰 것으로 나타났다. 이러한 이유는 최초 제내지로 유입된 홍수가 지형의 형태에 따라 민감하게 반응하는 단계로서, 홍수위 186m 에서는 파제지점 주변의 지형중 홍수위보다 다소 높은 상류 주변 지형의 영향으로 격자수가 작게 나타난 반면, 홍수위 189m 에서는 상대적으로 주변 지형의 표고값에 비해 홍수위가 상당히 높게 전파되므로 격자수가 크게 나타나게 된다. 이러한 홍수위별 홍수전파 차수에 따른 격자수는 홍수전파가 진행되면서 점점 그 차이가 감소하다가 차수 330~380 구간에서 다시 홍수위별 홍수전파 차수별 격자수의 차이가 나타났다. 이 구간은 평탄한 형태의 농경지에서 지형경사가 비교적 크게 나타나는 지역에 홍수가 전파함에 따라 홍수위별 홍수전파 격자수의 차이를 가져온 것으로 해석된다.

Fig. 7은 홍수전파 차수별 누계 침수면적으로써, 홍수위 186~189m의 침수면적은 각각 41,650㎡, 44,800㎡, 47,875㎡, 51,400㎡로서 홍수위 186m를 기준으로 홍수위 187~189m의 침수면적 증가율이 각각 1.08배, 1.15배, 1.23배로 증가율이 크지 않은 것으로 분석되었다. 이러한 이유는 파제지점으로부터 하류쪽 농경지의 표고값이 대부분 홍수위 186보다 낮은 분포를 보이기 때문인 것으로 판단되며, 홍수위 189m의 경우

농경지 외곽부를 중심으로 지형의 경사가 급격히 증가하는 형태를 보이므로 홍수위 186m와 3m의 수위 차이가 있음에도 불구하고 침수지역의 외곽 경계의 변화는 그리 크지 않은 것으로 해석되었다.

Figure 7. accumulated inundation area of each flood propagation order(left levee)

다만, 차수가 50~330 구간에서의 기울기가 상대적으로 완만하고 그 이상의 차수 구간에서는 누계 침수면적의 기울기가 약간 증가하는 것으로 나타났다. 차수 50~330 구간은 Fig. 4의 A1~A2 지역과 같이 농경지의 폭이 상대적으로 작고 농경지 주변에는 지형 경사가 큰 지역이 복합적으로 구성되어 있어 홍수전파가 특정한 방향을 중심으로 이루어져 나타난 결과로 해석된다. 아울러 차수 330 이상의 구간에서 누계 침수면적의 기울기가 약간씩 증가하는 패턴을 보이는 것은 Fig. 4의 A2~A3 지역과 같이 비교적 좁은 농경지에서 넓은 농경지로 홍수가 전파되면서 다양한 방향으로 홍수가 전파됨에 따라 홍수전파 차수 구간별 누계 침수면적이 상대적으로 증가하는 패턴을 보인 것으로 해석된다. 이와 같이 그래프의 기울기가 증가하는 지역은 단위시간내에 급속히 홍수파가 확산되는 구간에 해당되므로 해당 주민들의 대피시간이 충분하지 않아 대형 인명 사고가 발생할 가능성이 높은 지역이 될 가능성이 높다. 따라서 홍수기에 A2 지역에서 홍수가 급격히 A3 지역으로 전파되므로 이러한 특성을 보이는 지역은 홍수시 매우 위험한 구간에 해당되며, 따라서 홍수 위험 구간으로 분류하여 수재해시 신속한 대피가 이루어지도록 집중 관리할 필요가 있다.

본 연구에서 분석에 활용된 DEM 자료의 격자 해상도는 5m로서, 홍수시 물의 속도가 약 2~3m 정도라고

가정할 때 하나의 격자에서 다른 격자로 이동하는 홍수전파 시간은 약 2초 정도로 추정할 수 있다. 실제 홍수전파 속도는 지표상의 토지피복 상태나 지형지물 그리고 하상의 재질 등에 따라 달라질 수 있으나 대용량의 홍수가 전파될 때에는 지형 등의 영향은 비교적 적게 영향을 미치게 되므로 본 연구에서 가정한 부분이 비교적 합리적이라고 판단된다. 따라서, 이러한 부분을 제외하고 단순히 홍수전파 차수만을 고려하여 홍수전파 시간을 추정해 볼 때 최대 홍수전파 차수인 553차 까지 전파하는데 약 18분 26초의 시간이 소요되는 것으로 나타났다.

우안 제내지의 침수 특성을 분석하기 위해, 차산보 주변의 DEM 자료를 편집하여 제방 붕괴가 발생하도록 수정하였다. 수정된 DEM 자료를 기반으로 재귀호출 알고리즘을 이용하여 홍수위 183~186m 구간에 대해 홍수모의를 수행하여 Fig. 8과 같이 홍수전파 차수별 격자수를 계산하였다.

분석결과 홍수위 183~184m 구간에서는 최대 홍수전파 차수가 117차로 나타났으며, 홍수위 185m와 186m 구간에서는 최대 홍수전파 차수가 각각 278과 281차수로 나타났다. 좌안 파제지점 주변의 지형은 농경지 주변에 다소 표고값이 높은 지형으로 구성되어 있어 홍수위 183~184m 구간에서는 재귀호출 알고리즘에 의한 홍수전파의 영향이 비교적 적게 나타났다. 반면 185m 이상에서는 침수지역 중간지점과 같이 제방과 산림 사이에 184~185m 정도의 지형 표고값이 존재하여 그 부분을 중심으로 홍수가 하류 농경지로 전파되는 특성이 반영되어 최대 홍수전파 차수가 홍수위 183~184m 구간에 비해 급증한 것으로 나타났다(Fig. 8(c~d)). 또한 홍수위 186m 구간에서는 일부 홍수가 상류쪽으로도 전파되어 무주읍 외곽 주택지가 침수되는 것으로 모의되었다(Fig. 8(d)).

Fig. 9는 우안 제내지에 대한 홍수전파 차수별 격자수를 계산한 그래프이다. 파제지점을 중심으로 홍수전파 초기 구간인 차수 75 미만에서는 홍수전파 격자수가 홍수위별로 큰 차이를 나타내었으며, 이것은 재귀호출 알고리즘이 시작되는 파제 지점 주변지역이 홍수위 보다 낮은 지형 표고값을 갖지만 부분적으로 불규칙한 지형 표고값을 갖기 때문이며 이로 인해 홍수위별로 홍수가 전파되는 특성이 민감하게 나타난 것으로 해석된다. 또한 홍수위별 홍수전파 격자수도 대부분의 홍수위에 대해 크게 나타났으며, 이것은 좌안 파제지점 주변에 낮은 표고값을 갖는 지형의 영향이며 다만 홍수위 183m의 경우는 주변 지형의 표고값이 홍수위보다 약간 높게 형성되어 홍수전파 차수별 격자수가 다소 크지 않은 것으로 해석되었다.

홍수위 183~184m 구간에서는 주변 지형의 표고값

Figure 8. flood propagation order simulation result of each flood elevation for right levee inland

분포특성으로 인해 홍수전파 차수가 117까지만 전파되었으며, 홍수위 185~186m 구간을 살펴보면 홍수 전파 차수 75~225 구간에서 격자수가 매우 낮게 나타났다. 이 구간은 Fig. 8의 (c)~(d) 중 침수지역 중간

지점과 같이 제방과 산림 사이의 지형 표고값이 EL. 184~185m 사이에서 형성되어 있어 좁은 공간으로 홍수가 전파되는 특성상 상대적으로 홍수가 전파되는 격자수는 낮게 나타난 것으로 해석된다. 그리고 홍수 전파 차수가 225 이상 구간에서 크게 증가하는 구간은 Fig. 8의 (c)~(d) 중 침수지역 하류부 지점과 같이 좁은 공간을 빠져나온 홍수가 넓은 농경지를 만나면서 홍수전파가 크게 나타난 결과로 해석된다.

Fig. 10은 홍수전파 차수별 누계 침수면적으로써, 홍수위 183~186m의 침수면적은 각각 4,750m², 8,525 m², 19,175m², 29,950m²로서 홍수위 183m를 기준으로 홍수위 184~186m의 침수면적 증가율이 각각 1.79배, 4.04배, 6.31배로 증가율이 비교적 큰 것으로 분석되었다.

홍수전파 차수만을 고려한 우안의 홍수전파 시간을 분석한 결과, 홍수위 183~184m 에서는 홍수가 최종 지점까지 도달하는데 3분 54초의 시간이 소요되는 것으로 나타났으며, 홍수위 185m와 186m에서는 각각 9분 16초와 9분 22초로 계산되었다.

Figure 9. grids of each flood propagation order(right levee)

Figure 10. accumulated inundation area of each flood propagation order(right levee)

4. 결론

본 연구에서는 재귀호출 알고리즘을 기반으로 제방 붕괴 시나리오인 파제에 따른 홍수전파 특성을 분석하였으며, 주요 내용과 결론은 다음과 같다.

기존 침수해석 S/W에 대한 입력자료 내용 및 분석 결과 활용측면을 검토하였으며, 분석 결과 기존 모델의 경우 입력자료 생성에 많은 시간과 사전정보가 요구되어 홍수시 신속한 침수예측 정보를 제공하는데 제약이 있는 것으로 나타났다. 따라서, DEM 자료만으로 재귀호출 알고리즘에 의해 신속한 침수결과를 추정할 수 있는 기법 개발에 대한 필요성을 확보할 수 있었다.

좌안 제내지의 침수 특성을 분석한 결과 홍수위 186~189m 구간에서 모두 최대 홍수전파 차수가 553차까지 발생하였으며 이는 상류로부터 하류까지 농경지 형태의 평탄지로 구성되어 있어 병구보가 파제시 다량의 홍수가 유입되어 하류방향으로 홍수가 전파되어 최하단부까지 도달하게 됨을 알 수 있었다.

좌안지역을 대상으로 한 홍수위 186m 대비 홍수위 187~189m의 침수면적 증가율은 각각 1.08배, 1.15배, 1.23배로 증가율이 크지 않은 것으로 분석되었다. 이러한 이유는 파제지점으로부터 하류쪽 농경지의 표고값이 대부분 홍수위 186보다 낮은 분포를 보이기 때문인 것으로 판단되며, 홍수위 189m의 경우 농경지 외곽부를 중심으로 지형의 경사가 급격히 증가하는 형태를 보이는 것이 주요 원인으로 해석되었다.

하천 차수에 따른 기울기의 변화는 수재해시 홍수 위험 구간을 식별하는데 효과적이다. 좌안의 경우 차

수 330 이상의 구간에서는 누계 침수면적의 기울기가 약간씩 증가하는 패턴을 보였으며, 이것은 폭이 좁은 농경지 지역에서 폭이 넓어지는 지형으로 물이 전파되기 때문이며, 따라서 이 구간에 대해서는 홍수 위험 구간으로 분류하여 수재해시 신속한 대피가 이루어지도록 집중 관리할 필요가 있다. 그리고 홍수전파 차수만을 고려한 홍수전파 시간을 계산한 결과에서는 최대 홍수전파 차수인 553차 까지 전파하는데 약 18분 26초의 시간이 소요되는 것으로 분석되었다.

우안 제내지의 침수 특성을 분석한 결과 홍수위 183~184m 구간에서는 최대 홍수전파 차수가 117차로 나타났으며, 홍수위 185m와 186m 구간에서는 최대 홍수전파 차수가 각각 278과 281차수로 나타났다. 좌안 파제지점 주변의 지형은 농경지 주변에 산림과 같이 다소 표고값이 높은 지형으로 구성되어 있어 홍수위 183~184m 구간에서는 홍수전파의 영향이 비교적 적게 나타났으나 홍수위 185m 이상에서는 제방과 산림 사이의 지형이 홍수위보다 낮게 형성되어 그 부분을 따라 홍수가 낮은 경사 방향으로 전파되어 하류 농경지 부분으로 확산되는 특성이 반영된 것으로 나타났다.

우안지역을 대상으로 한 홍수위 183m 대비 홍수위 184~186m의 침수면적 증가율이 각각 1.79배, 4.04배, 6.31배로 증가율이 비교적 큰 것으로 분석되었다.

홍수전파 차수만을 고려한 우안의 홍수전파 시간을 분석한 결과, 홍수위 183~184m 에서는 홍수가 최종 지점까지 도달하는데 3분 54초의 시간이 소요되는 것으로 나타났으며, 홍수위 185m와 186m에서는 각각 9분 16초와 9분 22초로 계산되었다.

본 연구에서 제시한 재귀호출 알고리즘에 의한 홍수전파 차수의 분포특성을 통해 홍수의 전파 경로를 파악할 수 있고, 홍수전파 차수별 누계 침수면적 그래프의 기울기 패턴을 통해 홍수에 취약한 지역을 선별할 수 있다는 점에서 수재해 업무시 홍수위험 구간을 효과적으로 설정하는데 매우 유용할 것으로 판단된다. 또한 홍수전파 차수와 DEM 격자크기를 이용하여 홍수전파 시간을 추정할 수 있으므로, 파제시 각 지역별 홍수유입 시간을 파악하여 대피경로 및 대피시간과 같은 대책을 마련하는데 효과적인 정보를 제공할 것으로 판단된다.

References

- [1] Amol S. Naik; Shen Yin; Steven X. Ding; Ping Zhang. 2010, Recursive identification algorithms to design fault detection systems, Journal of

- Process Control, 20:957-965.
- [2] Bok, J. S. 2007, A Study on Hydraulic Characteristics due to Bridges Using Numerical Models, Master Thesis, Chungnam National University.
- [3] Brett F. Sanders. 2007, Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling, *Advances in Water Resources*, 30:1831-1843.
- [4] Chen, J; Hill, A. A. 2007, Modeling urban flood hazards: just how much does DEM resolution matter, *Applied Geography Conference*, 30: 372-379.
- [5] Choi, H. J; Han, G. Y; Kim, G. S. 2006, Rainfall Forecasting Using Satellite Information and Integrated Flood Runoff and Inundation Analysis(Ⅱ):Application and Analysis, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 26(6B):605-612.
- [6] Horritt, M. S; Bates, P. D. 2001, Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow, *Journal of Hydrology*, 253:239-249.
- [7] Jeollabuk-do Muju-gun. 2001, Basic Plan for River Maintenance for Namdae Stream.
- [8] Jeong, I. J; Park, S. J; Kim, S. Y. 2003, Development of Rivers Management system to Decrease flood Disaster using GIS, *Journal of Korean Society for Geospatial Information System*, 11(3):35-40.
- [9] Jian Chen; Arleen A. Hill; Lensyl D. Urbano. 2009, A GIS-based model for urban flood inundation, *Journal of Hydrology*, 373:184-192.
- [10] Kang J. I. 2008, A Study on the Calculation of Time to Equilibrium Considering Filling Time, Master Thesis, Chonbuk National University.
- [11] Kang, S. M; Park, M. J; Kim, S. H; Kim, S. J. 2007, A Study on the Mitigation of Inundation Damage Using Flood Inundation Analysis Model FLUMEN-For the Part of Jinwicheon Reach-, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers Magazine*, 27(6B):583-590.
- [12] Kim, S. H; Park, M. J; Kang, S. M; Kim, S. J. 2006, Modeling Rainfall-Runoff Simulation System of JinWie Watershed using GIS based HEC-HMS Model, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 9(4):119-128.
- [13] Lee, G. S; Choi, Y. W. 2010, The Simulation of Flood Inundation of Namdae Stream with GIS-based FLUMEN model, *Journal of Korea Spatial Information Society*, 18(2):25-34.
- [14] Liujuan Cao; Chaoguang Men; Yue Gao. 2013, A recursive embedding algorithm towards loss-less 2D vector map watermarking, *Digital Signal Processing*, 23:912-918.
- [15] Yun, S. H. 2006, Flood inundation analysis using the FLUMEN model for the land development in Gun-Jang district, Master Thesis, Chungnam National University.
- [16] Yun, T. H. 1999, *Applied Hydrology*, Chungmungak Press.

논문접수 : 2013.09.10

수 정 일 : 1차 2013.10.28 / 2차 2013.10.31

심사완료 : 2013.10.31