

LiDAR 고도자료와 LISFLOOD 모형을 이용한 홍수범람해석 *

최천규^{1*} · 최윤석¹ · 김경탁¹

Analysis of Flood Inundation Using LiDAR and LISFLOOD Model *

Cheon-Kyu CHOI^{1*} · Yun-Seok CHOI¹ · Kyung-Tak KIM¹

요 약

세계적으로 홍수로 인하여 인명과 재산의 피해가 발생하고 있다. 국내에서는 홍수피해를 줄이기 위하여 비구조물적 대책의 하나로 홍수범람지도를 작성하고 있으며, 홍수범람해석을 위한 다양한 모형이 연구되고 있다. 본 연구에서는 LiDAR 자료와 LISFLOOD 모형을 이용한 홍수범람해석을 수행하여 국내 하천에서의 적용성을 검토하고, 파제 시나리오에 의한 파제 위치별 범람해석 결과를 평가하였다. 범람해석 결과 최대 홍수범람면적에서는 HEC-RAS 모형에 의해 작성된 홍수범람도와 차이가 약 4% 미만으로 유사하였으며, 파제 시나리오에 의한 홍수범람해석에서는 시나리오별로 약 0.2%~6.5%의 범람면적 차이를 나타내었다. 또한 파제 위치에 따라서 홍수범람 양상이 다르게 나타났으며, 제내지에서 범람류의 흐름방향과 하천 흐름방향의 관계에 따라 최대 홍수범람면적과 최대 침수심이 변화함을 확인할 수 있었다. 연구 결과 국내 하천에서 홍수범람해석시 LISFLOOD 모형의 적용이 가능하고, 다양한 범람상황을 고려한 홍수범람해석이 가능할 것으로 판단된다.

주요어 : LISFLOOD, LiDAR, 홍수범람, HEC-RAS, 홍수범람지도

ABSTRACT

Great loss of life and property has been occurred by the severe flood globally. In Korea, a flood inundation map is used as one of the non-structural measures for reducing flood damage, and various inundation models have been studied for flood inundation analysis. This study applies LiDAR data and LISFLOOD model for flood inundation analysis and discusses the the modeling results from levee breaching

2013년 8월 14일 접수 Received on August 14, 2013 / 2013년 9월 16일 수정 Revised on September 16, 2013 / 2013년 10월 7일 심사완료 Accepted on October 7, 2013

* 본 연구는 한국건설기술연구원 13주요-시드사업(파제명-지방하천 홍수위험지도 제작기술 개발)의 연구비지원에 의해 수행되었음.

1 한국건설기술연구원 수자원연구실 Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology

* Corresponding Author E-mail : ckchoi@kict.re.kr

scenarios for evaluating the applicability of the model to stream inundation modeling. In the results of LISFLOOD modeling, maximum inundation area was similar to the inundation map by HEC-RAS model just less than 4%. The inundation area by each levee breaching scenario showed the difference from 0.2% to 6.5%. Inundation processes were different each other according to the position of levee breach point, and maximum inundation area and depth were changed by the flow direction of stream and flood plain. This study shows that LISFLOOD model can be applied properly to stream inundation analysis using various inundation scenarios.

KEYWORDS : LISFLOOD Model, LiDAR, Flood Inundation, HEC-RAS, Flood Inundation Map

서 론

세계적으로 홍수에 의해 재산과 인명에 많은 피해가 발생하고 있으며(Yu *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2011), 2013년에는 인도, 유럽, 중국, 북한 등 전 세계 각지에서 홍수에 의한 피해가 발생한 바 있다. 우리나라도 태풍과 호우로 인한 홍수피해액이 매년 증가하고 있으며(Lee *et al.*, 2013), 국민의 재산과 인명에 큰 피해를 발생시키고 있다(National Emergency Management Agency, 2005; 2011). 홍수범람에 의한 피해를 줄이기 위해서는 가상의 시나리오에 의한 홍수범람 해석을 통하여 홍수위험지도를 작성하고 홍수위험에 대한 정보를 사전에 국민들에게 제공하여 홍수발생시 안전한 대피경로, 대피장소, 대피요령 등에 대한 지식을 습득하도록 하여 홍수위험으로부터 생명을 보호할 수 있도록 해야 한다(Kim *et al.*, 2011). 국내에서는 하천법 제21조와 하천법시행령 제 17조에 의거하여 홍수위험지도 제작·활용에 관한 기준을 정하고 있으며(MLTM, 2008), 이에 따라 국토해양부에서는 비구조물적 대책의 한가지로 홍수위험지도를 작성하고 홍수발생시 취약지구 파악, 예방 및 복구, 홍수 피해 경감 등에 활용하고 있다.

국내에서는 홍수범람해석에 대한 연구가 1980년대부터 다양하게 이루어져 왔다(Kim *et al.*, 2011). Lee and Han(1989)은 제내지에 범람이 발생하였을 때, 유입량 예측 모형인

LEVBRK 모형을 제시하고 제방 붕괴 유형에 따른 제내지로의 유입량을 계산하였다. Park *et al.*(2011)은 FLDWAV 모형과 2차원 확산과 모형을 연계한 침수해석모형을 개발하여 침수 흔적도와 비교를 통하여 모형을 평가하였으며, Kim *et al.*(2011)은 1차원 하천수리 모형인 DAMBRK 모형을 이용하여 보성강댐의 붕괴에 의한 홍수범람해석을 수행하고 GIS와 연계한 홍수범람지도 작성에 대한 연구를 수행하였다.

홍수범람해석을 위한 1차원 모형의 적용에 대한 연구는 주로 HEC-RAS 모형을 이용하여 수행되었다. Lee *et al.*(2003)은 HEC-1 및 HEC-RAS 모형과 지리정보시스템을 연계하여 저해상도 지형자료와 고해상도 지형자료의 합성에 의해 구축된 DEM을 이용하여 홍수범람해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. Kim *et al.*(2012)은 강변저류지에 대하여 HEC-RAS 모형을 이용한 부정류 흐름 해석과 수리실험에 의한 결과를 비교하였으며, 완전 횡월류에 대한 안정적인 해석이 가능한 것으로 평가되었으나, 복잡한 형태의 월류와 역류현상에서는 해석 결과가 다소 차이가 발생하는 것으로 평가하였다. Jung *et al.*(2012)은 곤지암천 유역을 대상으로 SWAT 모형에 의한 해석 결과를 HEC-RAS 모형의 상류단 경계조건으로 활용하여 하류부에 대한 홍수범람해석을 수행한 바 있다. 또한 2차원 모형인 FLUMEN 모형을 이용한 홍수범람 해석에 대한 연구로는 Kang *et al.*(2007)은 FLUMEN 모형을 이용하여 빈도별 홍수범람해석을 수행하였으며, 대상 구간에

대하여 다양한 저감대책 시나리오를 적용하여 범람 저감 대책 방안에 대한 연구를 수행한 바 있다. Cho *et al.*(2010)은 금호강 유역에 대한 홍수위험지도 제작을 위해 FLUMEN 모형을 이용하여 월류에 의한 홍수범람해석을 수행하고 그 결과를 분석하였으며, Lee *et al.*(2013)은 쿼드트리 격자기반인 Gerris 모형과 FLUMEN 모형을 비교하여 Gerris 모형을 이용한 홍수범람해석의 적용성을 평가한 바 있다.

LiDAR 자료를 이용한 홍수범람에 대한 연구로 Shim and Lee(2006)는 LiDAR 자료를 이용하여 작성된 DEM과 1/5,000 수치지도를 이용하여 작성된 DEM을 이용하여 HEC-RAS 모형과 MIKE 모형을 이용하여 홍수범람해석을 수행하였으며, LiDAR자료를 이용한 범람해석 시 보다 정밀한 홍수범람이 가능한 것으로 판단하였다. Ha *et al.*(2010)은 LiDAR자료와 FLUMEN 모형을 이용하여 범람해석을 수행할 때, LiDAR 자료의 포인트 간격을 달리하여 범람해석 결과를 평가하였으며, 지형 표고가 급격히 변하지 않는 지역에 대해서는 10m 간격의 LiDAR 자료가 효율적으로 적용될 수 있음을 제시한바 있다. 이와 같이 국내에서는 홍수범람 지도 작성을 위한 1차원 및 2차원 모형의 적용과 고해상도 범람해석을 위한 LiDAR 자료의 적용에 대한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다.

우리나라에서는 외수범람에 의한 홍수위험지도 작성을 위해서 범람흐름을 유하형, 저류형, 확산형으로 구분하고, 범람 유형별 해석기법을 달리 적용하고 있으며, 해석방법은 대상지역의 중요도, 범람원의 지형조건, 이용 가능한 자료의 범위 및 홍수위험지도의 활용목적에 따라 채택되어진다(MLTM, 2008). 이 중 유하형 범람해석은 대상 지구를 제방이 없는 무제부 구간으로 가정하여 하도와 제내지가 연결된 하나의 단면상에서 1차원 부등류 해석을 실시하며, 무제부 가정에 의한 해석은 좌·우안 각각에 대하여 별도로 시행하는 것을 원칙으로 하되, 범람수위가 높아 양안에서 동시에 월류가 발생할 수 있는 경우에는 양안을 동시에 무제부로

가정하여 해석하도록 하고 있다. 이와 같이 유하형 범람해석은 범람원인을 월류와 과제로 구분하지 않고, 무제부를 가정함으로써 최대 침수심 및 침수영역을 모의하는 방법이다. 이때 HEC-RAS 모형 등을 이용한 1차원 부등류 해석을 이용한 홍수범람해석은 최대 홍수범람 영역과 최대 침수심에 대한 예측이 가능하지만, 시간별 홍수범람 영역의 확산형태를 파악하는 것과 범람류의 흐름이 하천의 흐름방향과 반대일 경우에는 범람해석을 수행하는데 한계가 있다.

본 연구에서는 2차원 부등류 해석이 가능하면서 래스터 지형고도를 활용하여 홍수범람해석을 수행할 수 있는 LISFLOOD 모형(Bates *et al.*, 2000)와 LiDAR 자료를 이용한 범람해석에 대해서 검토하고자 한다. LISFLOOD 모형은 래스터 지형자료와 시간에 따른 유량조건이 요구되며, 비교적 간단하며 합리적인 물리적 재현성을 가진 모형으로 평가되고 있다(KEI, 2009). 국외에서는 LISFLOOD 모형을 이용한 범람해석 연구가 다양하게 진행된 바 있으며(Horritt *et al.*, 2002; Horritt, 2006; Dankers *et al.*, 2007; Hunter *et al.*, 2007; Pappenberger *et al.*, 2007; Baldsarees *et al.*, 2010), De Roo *et al.*(2000)은 GIS와 연계한 LISFLOOD 모형을 유럽의 Meuse유역에 모형을 적용한 바 있다.

국내에서의 LISFLOOD 모형을 이용한 범람해석에 관한 연구로는 기후변화에 의한 범람 취약성을 평가하기 위하여 LISFLOOD 모형이 검토된 바 있으며(KEI, 2009), Kang *et al.*(2011)은 LISFLOOD 모형을 이용하여 홍수범람 해석을 수행하고, 범람해석 결과를 이용하여 농경지 저류지화에 따른 홍수저감 효과를 평가하였다. 이와 같이 국내에서는 LISFLOOD 모형을 이용한 연구가 일부 수행된 바 있으나, 홍수범람지도 작성을 위한 LISFLOOD 모형의 적용성 평가 및 기존 범람해석 모형과의 비교 평가에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구는 LISFLOOD 모형을 이용하여 홍수범람해석을 수행하고, 그 결과를 대상 구간에 대하여 HEC-RAS 모형에 의해 1차원

부등류 해석으로 구축된 바 있는 홍수범람도 (MLTM, 2011)와 비교함으로써 홍수범람도 작성을 위한 LISFLOOD 모형의 적용성 및 활용성을 검토하고자 한다.

LISFLOOD 모형

영국의 Bristol 대학의 Paul Bates교수에 의해 개발된 LISFLOOD 모형은 격자형 자료로 기반으로 하는 범람해석 모형으로 질량 보존과 물리적 개념을 이용하여 홍수범람을 모의한다 (Bates *et al.*, 2000; Dankers *et al.*, 2007). LISFLOOD 모형은 고해상도의 지형자료, 모형의 경계조건과 유량 유입지점에서의 시간에 따른 유량조건이 있어야만 적용이 가능하며, 동역학적 홍수의 전파를 비교적 정확하게 예측하고, 간단하면서도 합리적인 물리적 재현성을 가진 모형으로 평가되고 있다. 하도내 흐름 해석은 운동량과 연속방정식을 나타내는 1차원 St. Venants 방정식을 이용하며, 식 (1)과 식 (2)와 같다.

$$\text{Continuity Eq. : } \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\text{Momentum Eq. : } S_0 - \frac{n^2 P^{4/3} Q^2}{A^{10/3}} - \left[\frac{\partial h}{\partial x} \right] = 0 \quad (2)$$

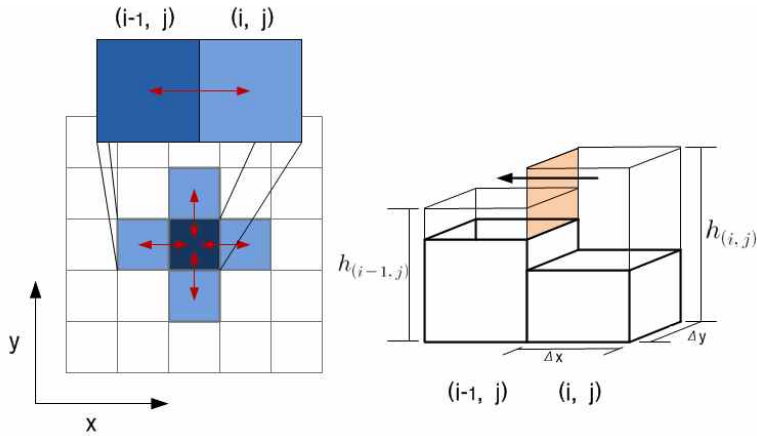


FIGURE 1. Grid analysis of LISFLOOD model

여기서, Q 는 하도내 유량, A 는 하도 단면적, q 는 측방유입량, S_0 는 하천 바닥 경사, n 은 Manning의 조도계수, P 는 윤변을 나타낸다. 범람원 해석에서는 두 셀 간의 수면고도 차이를 이용하여 흐름이 해석되며, 식 (3)과 식 (4)와 같다. 그림 1은 LISFLOOD 모형에서의 두 격자간의 흐름을 나타낸 것이다(Bates *et al.*, 2000; Hall *et al.*, 2005).

$$\frac{dh^{i,j}}{dt} = \frac{Q_x^{i-1,j} - Q_x^{i,j} + Q_y^{i,j-1} - Q_y^{i,j}}{\Delta x \Delta y} \quad (3)$$

$$Q_x^{i,j} = \frac{h_{flow}^{5/3}}{n} \left(\frac{h^{i-1,j} - h^{i,j}}{\Delta x} \right)^{1/2} \Delta y, \quad (4)$$

$$Q_y^{i,j} = \frac{h_{flow}^{5/3}}{n} \left(\frac{h^{i,j-1} - h^{i,j}}{\Delta y} \right)^{1/2} \Delta x$$

여기서, i 와 j 는 해당 격자점의 위치, $h^{i,j}$ 는 격자점(i, j)에서의 수면높이, $Q_x^{i,j}$ 는 $i-1$ 와 i 사이에 발생하는 유량, h_{flow} 는 $i-1$ 와 i 사이에 발생하는 유량 수심, $\Delta x, \Delta y$ 는 각 방향으로의 격자 크기를 나타낸다.

LISFLOOD 모형에서 하천 흐름은 1차원의 운동과 방정식 또는 확산과 방정식 중 하나를 선택하여 유한차분법으로 해석하며, 시간항에 대해서는 양해법을 이용한다(Bates *et al.*,

2010). 홍수범람 흐름은 2차원으로 해석하고 연속방정식과 수심차를 고려한 Manning공식으로 계산되며(Bates *et al.*, 2000), 흐름은 수심이 점진적으로 변화하는 점변류로 가정한다. 격자간 흐름은 등류 흐름공식(Manning공식 또는 웨어공식)으로 계산되고 SI단위계를 이용한다.

본 연구에서는 LISFLOOD 모형을 이용하여 하천의 흐름을 계산하고, 하상변화를 모의할 수 있는 LISFLOOD(CAESAR LISFLOOD v.1.2x) 모형을 이용하였다(Coulthard *et al.*, 2007). CAESAR LISFLOOD 모형은 사용자가 쉽게 접근할 수 있는 GUI를 가지고 있고 오픈소스로 제공되며, 하상변화 모의를 제외한 홍수범람만을 해석할 수 있다(Beckers *et al.*, 2013). 본 연구에서는 홍수범람해석을 위해 대상 구간을 하도와 범람원으로 구분하지 않고 전 구간에 대해 범람원 해석으로 적용하였다.

대상 구간 자료구축 및 연구방법

1. 대상 구간 입력자료 구축

본 연구에서는 LISFLOOD 모형을 이용한 홍수범람해석을 수행하고 그 결과를 1차원 부등

류 해석으로 작성된 홍수범람도와 비교하고자 한다. 따라서 2011년에 HEC-RAS 모형을 이용하여 작성된 홍수범람도(MLTM, 2011)가 존재하는 청미천 국가하천 구간을 검토하였으며, 범람해석 구간은 중부내륙고속도로와 청미천이 만나는 지점에서 하류로 5km구간을 선정하였다. 하천의 좌안을 범람해석 대상 제내지로 선정하였으며, 그림 2는 대상 구간을 나타낸 것이다. 대상 구간은 대부분 농경지이며, 농경지와 농경지 사이에는 주거지역, 축산 건물, 상가 등이 존재하고, 농경지와 산지와 만나는 부분에는 마을이 있다. 본 연구에서는 대상 구간 제내지를 삼승천을 기준으로 ZONE1과 ZONE2로 구분하였다(그림 2).

표 1은 본 연구에서 입력자료로 구축된 공간자료와 유량자료를 나타낸 것이다. 공간자료를 구축하기 위해서 제내지 영역은 1m 간격의 LiDAR자료를 이용하고, 제외지 영역은 수면 아래의 하상고도를 반영하기 위하여 청미천 하천정비기본계획보고서(MLTM, 2011)에서 제시된 하천단면 측량자료를 이용하였으며, 두 자료를 결합하여 10m×10m 크기의 DEM(Digital Elevation Model)을 생성하였다(Ha *et al.*, 2010). 또한 대상 구간은 국가하천으로 100년

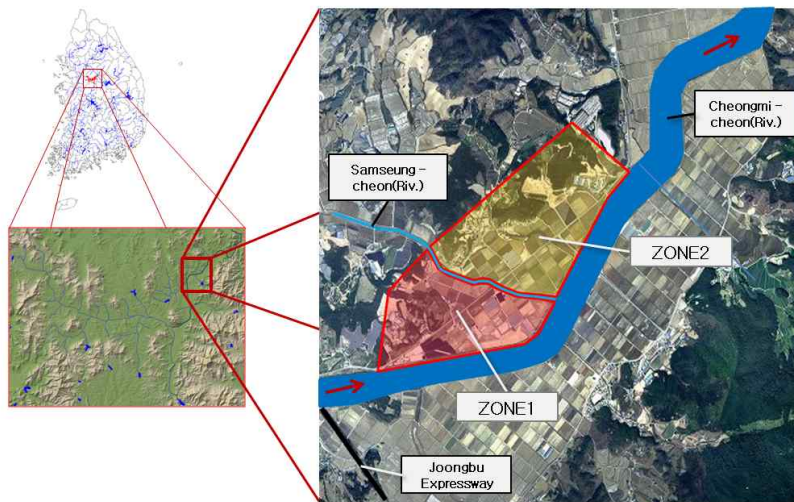


FIGURE 2. Target area

빈도 계획홍수량에 의해 제방이 구축되어 있다. 대상 구간의 기설제방고는 1994년에 산정된 100년 빈도 계획홍수위를 바탕으로 설계되었으나, 본 연구에서 활용된 2011년에 재산정된 계획홍수위는 1994년 산정된 100년 빈도 계획홍수위보다 약 15.42%~40.25% ($239m^3/s \sim 821m^3/s$) 정도 증가하였으며, 이에 따라 제방의 보축 및 보강 계획이 수립되어 있다 (MLTM, 2011).

따라서 본 연구에서는 기설제방고가 반영된

DEM에 계획제방고를 적용하여 제방고를 재구축하였다. 이때 계획제방고는 2011년에 산정된 100년 빈도 계획홍수위와 하천설계기준해설 (MLTM, 2009)에서 제시된 여유고 1.2m를 반영하여 산정하였으며, 표 2는 각 하천단면에 대해서 산정한 계획제방고를 나타낸 것이다. 그림 3(a)는 LiDAR와 하천단면 측량자료를 이용하여 구축된 $10m \times 10m$ 크기의 DEM에 계획제방고를 반영하여 구축한 최종 DEM과 표 2의 하천단면 측량번호를 나타낸 것이다.

TABLE 1. Input data

| Data | Method | Description |
|--------------|--|--|
| Spatial data | 10m×10m DEM (LiDAR+River cross-sectional data) | <ul style="list-style-type: none"> · LiDAR data - Multi-dimensional spatial-information construction project (National Geographic Information Institute, 2006) · River cross-sectional data - Cheongmi-cheon(Riv.) river maintenance master plan report (MLTM, 2011) |
| | Flow data for boundary condition | <ul style="list-style-type: none"> Design flood of 100year return period · Cheongmi-cheon(Riv.) river maintenance master plan report (MLTM, 2011) - at the downstream of Sulsung-cheon(Riv.) confluence |

TABLE 2. Calculation of design levee height

| No. | Design flood stage (EL.m) ¹⁾ | Design levee height (EL.m) ²⁾ | No. | Design flood stage (EL.m) ¹⁾ | Design levee height (EL.m) ²⁾ |
|--------|---|--|--------|---|--|
| 9+200 | 54.96 | 56.16 | 11+400 | 56.07 | 57.27 |
| 9+400 | 55.05 | 56.25 | 11+540 | 56.21 | 57.41 |
| 9+500 | 55.10 | 56.30 | 11+600 | 56.26 | 57.46 |
| 9+600 | 55.14 | 56.34 | 11+800 | 56.46 | 57.66 |
| 9+800 | 55.24 | 56.44 | 12+000 | 56.65 | 57.85 |
| 10+000 | 55.33 | 56.53 | 12+052 | 56.70 | 57.90 |
| 10+042 | 55.35 | 56.55 | 12+200 | 56.85 | 58.05 |
| 10+200 | 55.42 | 56.62 | 12+400 | 57.05 | 58.25 |
| 10+400 | 55.51 | 56.71 | 12+556 | 57.21 | 58.41 |
| 10+536 | 55.59 | 56.79 | 12+600 | 57.25 | 58.45 |
| 10+600 | 55.62 | 56.82 | 12+800 | 57.45 | 58.65 |
| 10+800 | 55.73 | 56.93 | 13+000 | 57.65 | 58.85 |
| 11+000 | 55.85 | 57.05 | 13+108 | 57.76 | 58.96 |
| 11+057 | 55.88 | 57.08 | 13+200 | 57.85 | 59.05 |
| 11+200 | 55.96 | 57.16 | 13+400 | 58.05 | 59.25 |
| 11+275 | 56.00 | 57.20 | 13+600 | 58.25 | 59.45 |

1) Cheongmi-cheon(Riv.) river maintenance master plan report(MLTM, 2011)

2) Design flood stage(EL.m) + Freeboard(1.2m) = Design levee height(EL.m)

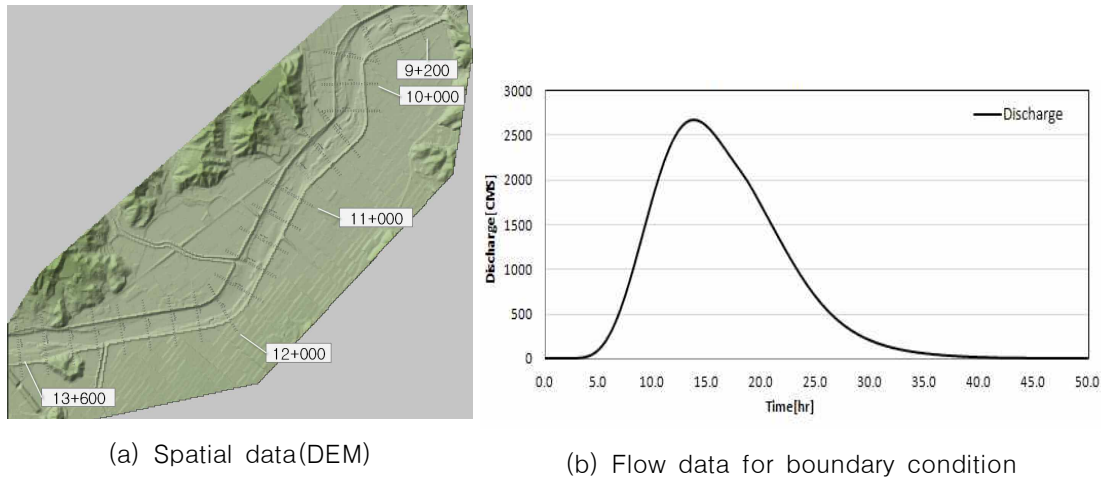


FIGURE 3. LISFLOOD model input data

대상 구간에서 상류단 경계조건으로 활용되는 유량자료는 청미천 하천정비기본계획보고서(MLTM, 2011)에서 제시된 100년 빈도 계획홍수량인 $2,670\text{m}^3/\text{s}$ 을 이용하였고, 부정류 해석을 하기 위하여 청미천 하천정비기본계획보고서에서 HEC-1에 의해 산정된 설성천 합류후의 100년 빈도 계획홍수량을 활용하였으며, 그림 3(b)는 본 연구에서 적용한 계획홍수량의 수문곡선을 나타낸 것이다.

CAESAR LISFLOOD 모형에 의한 홍수범람 해석을 수행하기 위해 사용자가 정의하는 매개변수는 흐름발생 조건인자인 최소수심, 격자에서 수치계산의 안정성을 위한 Courant number, Manning의 조도계수 등이 있으며, 50m 크기의 격자에서 최소수심은 0.5, Courant Number는 0.5를 제안하고 있다. 따라서 본 연구에서는 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 크기의 DEM을 이용하여 LISFLOOD 모형에 의한 범람해석을 안정적으로 수행하기 위하여 시행착오법에 의해 매개변수를 설정하였으며, 최소수심은 모형에서 제시된 값을 비례 감소시킨 0.1m, Courant Number는 0.2, Manning의 조도계수는 하천정비기본계획보고서에 제시된 0.03을 사용하였다.

2. 연구방법

본 연구는 LISFLOOD 모형을 이용하여 홍수범람해석을 수행하고, 이를 청미천 하천정비기본계획보고서(MLTM, 2011)에서 HEC-RAS 모형에 의해 산정된 100년 빈도 홍수량에 대한 홍수범람도와 비교하였으며, 그림 4는 본 연구의 절차를 나타낸 것이다.

먼저, 구축된 DEM과 유량 경계조건을 입력하여 LISFLOOD 모형을 이용한 홍수범람해석을 수행하고, 해석 결과를 통하여 DEM에 적용된 계획제방고와 유량조건이 대상 구간에 대하여 적절하게 반영되는지를 평가한다. 다음으로는 LISFLOOD 모형을 이용한 무제부를 가정한 홍수범람해석을 수행하고 그 결과를 청미천 하천정비기본계획에서 제시된 100년 빈도 홍수범람도와 비교한다.

또한 대상 구간에 파제 시나리오를 설정하여 각 시나리오별 LISFLOOD 모형을 이용한 홍수범람해석을 수행하고, 파제 시나리오별 홍수범람해석 결과와 HEC-RAS 모형에 의해 산정된 홍수범람도를 비교하여 각 시나리오별 범람 양상을 평가하였다.

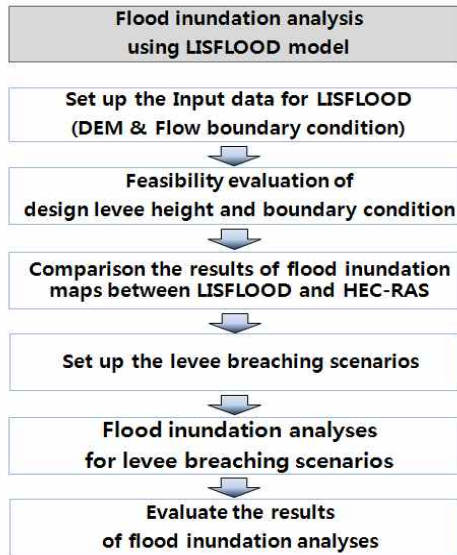


FIGURE 4. Research flow chart

LISFLOOD 모형을 이용한 홍수범람해석

1. 계획제방고를 이용한 범람해석

계획제방고(계획홍수위+여유고)가 적용된 DEM과 100년 빈도 계획홍수량을 이용하여 LISFLOOD 모형을 이용한 홍수범람해석을 수행하였으며, 그림 5는 계획제방고가 적용된 DEM에서의 LISFLOOD 모형에 의한 홍수범람 해석 결과를 나타낸 것이다. 해석결과 계획제방고를 월류하는 홍수범람이 발생하지 않았으며, 100년 빈도 계획홍수량으로부터 구축된 계획제방고가 LISFLOOD 모형에서 적절하게 적용된 것을 확인할 수 있었다.

2. 무제부를 가정한 범람해석 결과 비교

청미천 하천정비기본계획보고서(MLTM, 2011)에 제시된 HEC-RAS 모형에 의해 구축된 홍수범람도와 최대 침수범위를 비교하기 위하여 LISFLOOD 모형을 이용하여 무제부를 가정한 홍수범람해석을 수행하였으며, 표 3과 같다. ZONE1과 ZONE2에서의 범람면적은 HEC-RAS 모형을 이용하여 계산된 범람면적과 비교하였을 때 각각 103.90%, 100.97%로 유사하게 산정되었다. 또한 LISFLOOD 모형을 이용하여 최대 침수심을 계산할 수 있었으며,

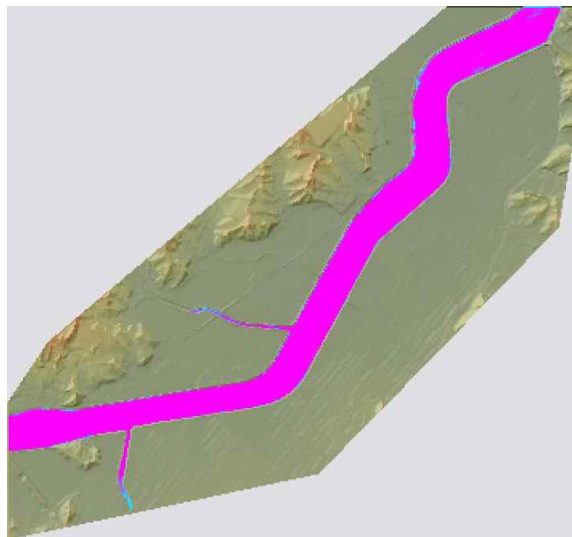


FIGURE 5. Flooding analysis result(red area) using design levee height

TABLE 3. Comparison of flood inundation analyses(non-levee)

| Flood inundation analysis | | ZONE1 | ZONE2 |
|------------------------------|----------------------------------|---------|---------|
| HEC-RAS ¹⁾ | Inundation area[m ²] | 374,856 | 400,749 |
| LISFLOOD | Inundation area[m ²] | 389,464 | 404,621 |
| | Max. water depth[m] | 3.17 | 2.73 |
| Areal ratio[%] ²⁾ | | 103.90 | 100.97 |

1) Cheongmi-cheon(Riv.) river maintenance master plan report(MLTM, 2011)

2) Areal ratio[%] = (Inundation area of LISFLOOD/ Inundation area of HEC-RAS) * 100

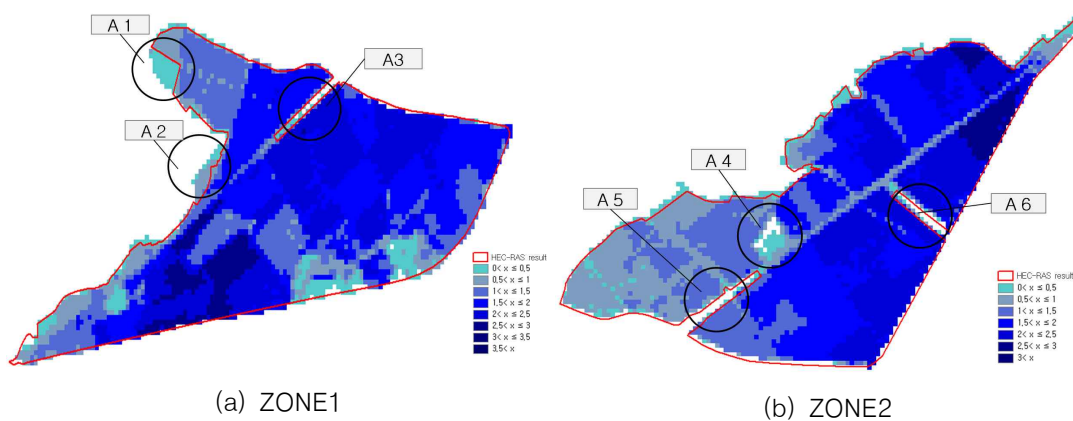


FIGURE 6. Flood inundation analyses using LISFLOOD model (assumed non-levee)

ZONE1과 ZONE2에서 각각 3.17m, 2.73m로 산정되었다.

그림 6은 LISFLOOD 모형과 HEC-RAS 모형에 의해 산정된 홍수범람도를 나타낸 것이며, A1~A6영역에 대해서 범람해석 결과를 비교하였다. A1~A6 중 A3, A5, A6은 도로 구간으로 주변 농경지보다 높은 고도값을 가지며, 이에 따라 HEC-RAS와 LISFLOOD 모형에서 모두 침수되지 않는 것으로 모의되었다. A1, A2, A4는 두 모형의 계산 결과가 상이한 지역이다. 이와 같이 두 모형에서 각기 다른 결과를 나타내는 원인으로는 두 모형의 범람해석에 적용된 자료의 해상도와 구축연도가 서로 상이하고, LISFLOOD 모형은 하천 구간에 연속적인 지형자료를 이용하여 범람해석을 수행하지만, HEC-RAS 모형은 하천 단면에서 산정된 홍수위를 제내지까지 연장하여 홍수범람면적을 산정함에 따라서 하천 단면과 단면사이의 불연속성이 해석결과에 반영되었기 때문으로 판단된다.

3. 파제 시나리오에 의한 홍수범람해석

파제 시나리오를 설정하고 LISFLOOD 모형을 이용한 홍수범람해석을 수행하기 위해 대상 구간에 파제 지점을 선정하였다. 파제 지점은 대상 구간의 좌안에 대하여 총 8개 지점을 선정하였으며, 그림 7은 각 파제 설정구간을 나타낸 것이다. 파제 구간의 폭은 홍수위험지도 제작에 관한 지침(MLTM, 2008)에 제시되어 있는 파제폭 설정 공식을 이용하였으며, 식 (5)와 같다. 파제구간의 제방 고도는 인접한 제내지 고도값과 동일하게 구축하였다. 파제폭은 모든 측선에서 약 90m로 산정되었으며, 본 연구에서 구축된 10m의 격자크기의 DEM에 적용하기 위하여 각 구간에 대해 9개 격자에서의 고도를 재설정하였다. ZONE1과 ZONE2 사이에는 삼승천이 흐르고 있으며, 파제설정 구간인 CR1~CR5는 ZONE1에 영향을 미치고, CR6~CR8은 ZONE2에 영향을 미친다.

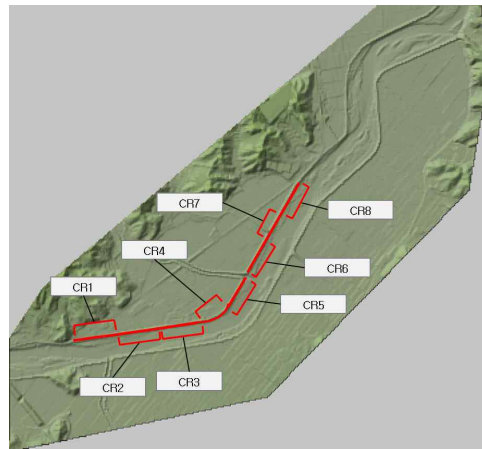


FIGURE 7. Decision point of levee breaching section

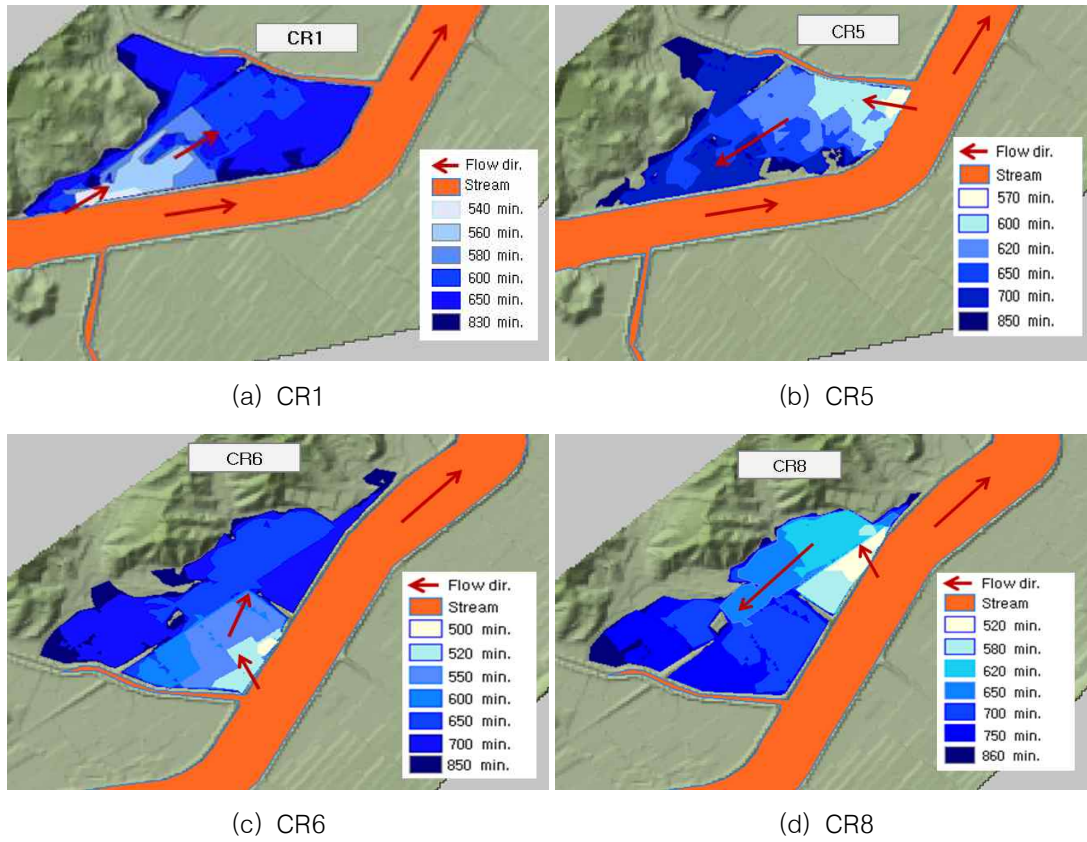


FIGURE 8. Inundation areas according to the time(CR1, CR5, CR6 and CR8)

TABLE 4. Comparison of the inundation analyses result about each scenario

| | | ZONE1 | | | | | ZONE2 | | |
|-----------------------|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| HEC-RAS ¹⁾ | Inundation area[m ²] | 374,856 | | | | | 400,749 | | |
| | CR | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| LISFLOOD | Inundation area[m ²] | 394,043 | 390,893 | 389,647 | 372,574 | 345,455 | 426,711 | 401,662 | 394,524 |
| | Max. water depth[m] | 3.59 | 3.52 | 3.44 | 2.89 | 2.48 | 3.16 | 2.88 | 2.68 |
| | Areal ratio[%] ²⁾ | 105.1 | 104.3 | 103.9 | 99.4 | 92.2 | 106.5 | 100.2 | 98.4 |

1) Cheongmi-cheon(Riv.) river maintenance master plan report(MLTM, 2011)

2) Areal ratio[%] = (Inundation area of LISFLOOD/ Inundation area of HEC-RAS) × 100

$$y = 1.9 \times (\log_{10} x^{3.8} + 20) \quad (5)$$

여기서, x 는 하폭(m), y 는 파제폭(m)을 나타낸다.

그림 8은 각 ZONE에서 범람면적이 가장 크게 모의된 파제 시나리오(CR1, CR6)와 가장 작게 모의된 시나리오(CR5, CR8)에 대한 시간별 LISFLOOD 모형의 홍수범람해석 결과를 나타낸 것이며, 표 4는 ZONE1과 ZONE2에서의 각 파제 시나리오별 홍수범람해석 결과를 HEC-RAS 모형에 의해 산정된 100년 빈도 홍수범람도(MLTM, 2011)와 비교하여 나타낸 것이다.

LISFLOOD 모형을 이용하여 파제 시나리오에 의한 범람해석 결과, ZONE1에서는 CR1, CR2와 CR3에서 파제되었을 때 최대 홍수범람면적과 침수심이 유사하게 나타났으나, CR4와 CR5는 CR1~CR3의 범람해석 결과보다 최대 홍수범람영역은 감소되고(최대 14%) 최대 침수심도 낮게(최대 1.11m) 모의되었다. ZONE1과 마찬가지로 ZONE2에서도 CR6에서 CR8로 파제 위치가 이동할수록 홍수범람영역이 감소되었으며, 최대 침수심은 낮아지는 것으로 모의되었다. 또한 파제 시나리오에 의한 홍수범람면적과 하천정비기본계획보고서(MLTM, 2011)에서 HEC-RAS 모형에 의해 작성된 홍수범람도의 범람면적을 비교한 결과 CR1~CR3과 CR6~CR7에서는 HEC-RAS 모형에 의해 작성된 홍수범람도보다 면적이 크게 모의되었으

며, CR4와 CR5와 CR8은 작게 모의되었다. 이와 같이 파제 지점별로 범람면적이 달라지는 것은 하천의 흐름방향과 범람류의 흐름방향의 관계에 의한 것으로 판단된다. 즉, 그림 8에서와 같이 CR1~CR3 및 CR6~CR7 지점에서의 범람류는 하천의 흐름방향과 동일한 흐름 방향을 나타냄으로써 상대적으로 큰 범람면적을 나타내고 있으며 CR4, CR5, CR8위치에서의 파제에 의한 범람류는 하천의 흐름방향과 반대의 방향으로 진행함으로써 범람면적이 상대적으로 작게 산정된 것으로 나타났다.

LISFLOOD 모형과 HEC-RAS 모형의 범람해석 비교 결과 HEC-RAS 모형은 하도의 흐름방향과 반대 방향으로 발생하는 범람류의 흐름 해석이 어려우며, 이에 따라 다양한 파제 시나리오를 적용한 범람해석에 많은 한계가 있다. 그러나 LISFLOOD 모형을 이용한 홍수범람해석에서는 실제 지형자료를 쉽게 반영하여 홍수범람해석을 수행할 수 있으며, 다양한 파제 시나리오를 이용한 홍수범람해석, 무제부를 가정한 범람해석, 제방의 월류범람 발생 유무 등 다양한 홍수범람해석을 수행할 수 있는 것으로 나타났다.

결론

본 연구는 청미천 국가하천 구간에 대하여 LISFLOOD 모형을 이용하여 계획제방고, 무제부 가정, 파제 시나리오에 대한 각각의 홍수범

람해석을 수행하고, HEC-RAS 모형을 이용하여 작성된 홍수범람도와 비교하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

첫째, LiDAR 자료와 하천단면 측량자료를 이용하여 계획제방고를 산정하였으며, 계획제방고를 적용한 10m×10m 크기의 DEM과 100년 빈도 계획홍수량을 범람해석에 적용하였다. 계획제방고를 이용한 범람해석 결과 제방을 넘는 월류범람이 발생하지 않았다. 그러므로 계획제방고가 반영된 DEM 및 홍수량 경계조건이 적절히 반영된 것으로 판단된다.

둘째, 무제부를 가정한 LISFLOOD 모형의 홍수범람해석 결과와 HEC-RAS 모형에 의해 산정된 홍수범람도를 비교하였다. ZONE1과 ZONE2에서 LISFLOOD 모형을 이용한 범람면적은 HEC-RAS 모형에 의해 구축된 홍수범람도와 비교하여 각각 약 103.9%, 101.0%를 나타내었다. 이를 통하여 LISFLOOD 모형을 이용한 무제부 가정 범람해석은 HEC-RAS 모형과 유사한 재현성을 나타냄을 알 수 있었다.

셋째, 파제 시나리오에 의한 LISFLOOD 모형의 홍수범람해석 결과 각 파제 시나리오별 범람면적이 HEC-RAS 모형을 이용한 홍수범람도의 면적을 기준으로 약 92.2%~106.5% 정도의 차이를 나타냈다. 파제 구간의 위치에 따라서 최대 홍수범람면적과 최대 침수심이 변화함을 알 수 있었으며, 이는 하천의 흐름 방향과 범람류의 흐름방향의 관계에 의한 것으로 판단된다.

넷째, LISFLOOD 모형을 이용하여 동일한 제내지에 대하여 다양한 파제 시나리오에 의한 홍수범람 해석이 가능한 것으로 나타났으며, 파제 시나리오별 대상 구간의 시간별 침수심의 분포와 제내지에서의 범람 흐름방향을 확인할 수 있었다. 향후 LISFLOOD 모형을 이용하여 범람 흐름을 시나리오별로 예상하고 대상 구간의 홍수피해 발생 예상지역을 사전에 파악함으로써 재해대책 수립에 활용 가능할 것으로 판단된다.

다섯째, 본 연구에서 LISFLOOD 모형의 범람해석 결과와 비교한 HEC-RAS 모형에 의한

홍수범람도는 시간별 범람흐름의 파악과 다양한 범람 조건을 반영한 해석이 어렵다. 또한, 2차원 범람해석 모형인 FLUMEN 모형은 입력 자료의 구축과 모형 구동에 많은 시간이 소요된다. 본 연구에서 적용한 LISFLOOD 모형은 DEM과 상류단 경계조건인 유량 수문곡선을 이용하여 홍수범람해석을 수행할 수 있으며, 파제, 무제부, 제방 고도의 변화와 같은 다양한 제방 조건을 DEM에 손쉽게 반영하여 모의할 수 있다. 그러므로 홍수위험지도 작성 시 LISFLOOD 모형을 이용한 홍수범람해석을 수행함으로써, 모형 구축에 소요되는 시간과 비용을 줄이고 다양한 시나리오의 적용을 통하여 간편하게 범람해석 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다. [KAGIS](#)

REFERENCES

- Baldassarre, G.D., G. Schumann, P.D. Bates, J.E. Freer and K.J. Beven. 2010. Flood-plain mapping: a critical discussion of deterministic and probabilistic approaches. *Hydrological Sciences Journal* 55(3):364-376.
- Bates, P.D. and A.P.J. De Roo. 2000. A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology* 236(1-2):54-77.
- Bates, P.D., M.S. Horritt and T.J. Fewtrell. 2010. A simple inertial of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology* 387:33-45.
- Beckers, B. and Schutt, B. 2013. The elaborate floodwater harvesting system of ancient Resafa in Syria-Construction and reliability. *Journal of Arid Environments* 96:31-47.

- Cho, W.H., K.Y. Han and K.H. Ahn. 2010. Flood risk mapping with FLUMEN model application. *Journal of the Korean Society of Civil Engineering* 30(2B):169-177 (조완희, 한건연, 안기홍. 2010. FLUMEN모형을 적용한 홍수위험지도의 작성. *대한토목학회논문집* 30(2B):169-177).
- Coulthard, T.J., D.M. Hicks, M.J. Van De Weil. 2007. Cellular modelling of river catchment and reaches: advantages, limitations and prospects. *Geomorphology* 90:192-207.
- Dankers, R., O.B. Christensen, L. Feyen and M. Kalas. 2007. Evaluation of very high-resolution climate model data for simulating flood hazards in the upper danube basin. *Journal of Hydrology* 347:319-331.
- De Roo, A.P.J., D.G. Wesseling, and Van Deursen. 2000. Physically-based River basin modelling within a GIS: the LISFLOOD model. *Hydrological Process* 14:1981-1992.
- Ha, C.Y., K.Y. Han and W.H. Cho. 2010. 2-D inundation analysis according to post-spacing of DEMs from LiDAR using GIS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 13(1):74-88 (하창용, 한건연, 조완희. 2010. GIS를 활용한 LiDAR 자료의 밀도에 따른 2차원 침수해석. *한국지리정보학회지* 13(1):74-88).
- Hall, J.W., S. Tarantola, P.D. Bates and M.S. Horritt. 2005. Distributed sensitivity analysis of flood inundation model calibration. *Journal of Hydraulic Engineering* 131:117-126.
- Horritt, M.S. 2006. A methodology for the validation of uncertain flood inundation models. *Journal of Hydrology* 326:153-165.
- Horritt, M.S. and P.D. Bates. 2002. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology* 268:87-99.
- Hunter, N.M., P.D. Bates, M.S. Horritt and M.D. Wilson. 2007. Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: a review. *Geomorphology* 90:208-225.
- Jung, C.G., H.K. Joh, Y.S. Yu, J.Y. Park and S.J. Kim. Study on damage reduction by flood inundation and the sediments by SWAT and HEC-RAS modeling of flow dynamics with watershed hydrology -for 27 July 2011 heavy storm event at GonjiamCheon watershed-. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(2):87-94 (정충길, 조형경, 유영석, 박중윤, 김성준. 2012. SWAT 및 HEC-RAS 모형의 수문-수리 연계모델링을 통한 곤지암천 유역의 하천범람 및 토사유출 피해저감 연구 -2011년 7월 27일 국지성 폭우를 대상으로-. *한국농공학회논문집* 54(2):87-94).
- Kang, H.S., S.Y. Cho and Y.I. Song. 2011. A study on flood storage plans of farmlands for extreme flood reduction. *Journal of Korea Water Resources Association* 44(10):787-795 (강형식, 조성윤, 송영일. 2011. 극한홍수 저감을 위한 농경지의 저류지화 방안 연구. *한국수자원학회논문집* 44(10):787-795).
- Kang, S.M., M.J. Park, S.H. Kim and S.J. Kim. 2007. A study on the mitigation

- damage using flood inundation analysis model FLUMEN -for the part of Jinsicheon reach-. Journal of the Korean Society of Civil Engineering 27(6B):583-590 (강수만, 박민지, 김상호, 김성준. 2007. 홍수범람해석모형을 이용한 침수피해 저감방안 연구 -진위천 하천구간을 대상으로-. 대한토목학회논문집 27(6B):583-590).
- Kim, B.H., S.Y. Choi and K.Y. Han. 2011. An analysis method of 1D hydrodynamic model based on GIS for flood inundation mapping. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation 11(6):227-235 (김병현, 최승용, 한건연. 2011. 홍수범람지도 작성을 위한 GIS기반 1차원 동역학적 해석 기법. 한국방재학회논문집 11(6):227-235).
- Kim, S.J., S.J. Hong, B.M. Yoon and U. Ji. 2012. Feasibility analysis of HEC-RAS for unsteady flow simulation in the stream channel with a side-weir detection basin. Journal of Korea Water Resources Association 45(5):495-503 (김서준, 홍상진, 윤병만, 지운. 2012. 강변 저류지가 있는 하도에서의 부정류 흐름 모의 를 위한 HEC-RAS의 적용성 검토. 한국수 자원학회논문집 45(5):495-503).
- Korea Environment Institute. 2009. Fundamental research on costal landward boundaries integrated flood forecasting methods according to the climate change (한국환경정책·평가연구원. 2009. 기후변화에 따른 연안역의 해역-육역 통합 범람 예측 방안에 관한 기초 연구: 해석모형 비교·분석을 중심으로).
- Lee, D.E., H.U. An, G.H. Lee and K.S. Jung. 2013. Application evaluation of flood inundation analysis using quadtree grid-based model. Journal of Korea Water Resources Association 46(6):655-666 (이대업, 안현욱, 이기하, 정관수. 2013. 쿼드트리 격자기반 모형의 홍수범람 해석 적용성 평가. 한국수자원학회논문집 46(6):655-666).
- Lee, J.H., J.J. Choi, H.C. Lee and E.T. Lee. 2003. Mapping of floodplain boundaries using high spatial resolution DEM. Journal of the Korean Society of Civil Engineering 23(6B):471-478 (이주현, 최종진, 이희철, 이은태. 2003. 고해상도 수치고도모형을 활용한 홍수범람도의 작성. 대한토목학회논문집 23(6B):471-478).
- Lee, J.T. and K.Y. Han. 1989. A forecasting model for the flooded area resulting from breached levee. Journal of Korean Association of Hydrological Sciences 22(2):223-231 (이종태, 한건연. 1989. 하천제방의 붕괴로 인한 제내지의 침수예측 모형. 한국수문학회지 22(2):223-231).
- MLTM(Ministry of Land, Transport and Maritime). 2008. Guidance on flood risk mapping (국토해양부. 2008. 홍수위험지도 제작에 관한 지침).
- MLTM(Ministry of Land, Transport and Maritime). 2009. River design criteria-explanation (국토해양부. 2009. 하천설계 기준·해설).
- MLTM(Ministry of Land, Transport and Maritime). 2011. Cheongmi-cheon(Riv.) river maintenance master plan report (국토해양부. 2011. 청미천 하천정비기본계획보고서).
- National Emergency Management Agency. 2005. Annual disaster report in 2003 (소방방재청. 2005. 2003년 재해연보).
- National Emergency Management Agency.

2011. Annual disaster report in 2010 (소방방재청. 2011. 2010년 재해연보).
- National Geographic Information Institute. 2006. Multi-dimensional spatial information construction project (국토지리정보원. 2006. 다차원 디지털 공간정보구축 표준 매뉴얼).
- Pappenberger, F., K. Frodsham, K. Beven, R. Romanowicz and P. Matgen. 2007. Fuzzy set approach to calibrating distributed flood inundation models using remote sensing observation. *Hydrology and Earth System Sciences* 11(2):739-752.
- Park, S.J., H.G. Choi, Y.H. Huh and K.Y. Han. 2011. Establishment and application of 2-dimensional flood inundation analysis system by the collaboration of river and lowland in Nam river basin. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 11(6):237-247 (박세진, 최현구, 허윤형, 한건연. 2011. 하천과 저지대를 연계한 2차원 홍수범람 해석체계 구축 및 남강유역에의 적용. *한국방재학회논문집* 11(6):237-247).
- Shim, J.M.. and S.B. Lee. 2006. The study of flood simulations using LiDAR data. *The Journal of Korean Society for Geographical Information System* 14(4):53-60 (심정민, 이석배. 2006. LiDAR 자료를 이용한 홍수 시뮬레이션에 관한 연구. *한국지형공간정보학회지* 14(4):53-60).
- Yu, J.H., H.J. Kim and Y.S. Cho. 2005. Development of a combined model for flood inundation simulation. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 5(4):1-8 (유재홍, 김형준, 조용식. 2005. 홍수범람모의를 위한 내외수 연계모형 개발. *한국방재학회논문집* 5(4):1-8). **KAGIS**