

# 행위자 기반 모델링을 활용한 시간에 따른 침수 지역 예상

김병일\* · 신사철<sup>1</sup> · 정재훈<sup>2</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 토목공학과 · <sup>2</sup>독일 본대학교 사진측량학과

## An Agent-Based Modeling Approach for Estimating Inundation Areas over Time

Kim, Byungil\*, Shin, Sha Chul<sup>1</sup>, Jung, Jaehoon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Andong National University

<sup>2</sup>Department of Photogrammetry, University of Bonn

**Abstract :** Emergency and evacuation planning is critical to reduce potential loss of life from flooding. In order to develop evacuation plans, emergency managers and decision makers require estimates of probable inundation areas and times of inundation. In this paper, we present an agent-based modeling approach that incorporates in a hydrodynamic model to estimate both of these properties. A case study is conducted modeling the failure of a dam located in Andong, South Korea. We estimate flood travel times for Manning's roughness coefficients and discharge using a coupling of the continuity equation and Manning's equation. Using the output from the hydrodynamic model and the flood travel times, the agent-based model produces flood inundation maps at each time interval. The model estimates that for two-thirds of the Andong region the time of inundation is estimated to be slightly less than three minutes. The results of this study can be used to in the development of emergency and evacuation planning for the region.

**Keywords :** Inundation, Agent-Based Modeling, Disaster Management, Climate Change

### 1. 서론

전 세계는 기상재해로 인해 막대한 경제적 손실 및 인명 피해를 입고 있다. 게다가 이 손실은 증가 추세에 있다. 일례로 경제적 손실로 인해 지급된 보험금은 지난 40년 동안 같은 시기 화폐가치로 연간 5억 달러에서 27억 달러까지 급등하였다(Bresch and Spiegel, 2011). 극한 기상 사상(extreme weather event)을 야기하는 기후변화는 이 추세를 강화시킬 전망이다(Kim et al., 2013). 만약 이에 대한 대비를 하지 않는다면 일부 국가의 경우 2030년 국내 총생산의 19%에 달하는 비용을 지불하는 사태가 발생할 수 있다(ECA Working Group, 2009). 경제적 손실뿐만 아니라 인명 피해 또한 증가하는 추세이다. NEMA(2011)의 집계에 따르면 우리나라의 경우 홍수로 인해 1990년대 및 2000년대에 각각 169명 및 734

명이 사망하였다.

기상재해로 인한 경제적 손실 및 인명 피해를 저감하기 위한 수단들은 두 가지 유형으로 대별될 수 있다: 재해 발생의 원인 자체를 제거하는 유형; 재해 발생을 전제하고 손실 및 피해의 확산을 차단하는 유형. 침수를 일례로, 자산의 침수를 막기 위해 제방과 같은 구조물을 축조하는 것이 전자에 해당하고, 침수된 도로의 복구 시간을 단축하거나 침수 예상 지역 밖으로 사람들을 신속하게 대피시키는 것이 후자에 속한다. 지금까지의 연구 경향은 기후변화에 의한 극한 기상 사상의 빈도 및 강도 증가를 예상하고 신규 구조물에 대한 설계기준을 재정립하거나 기존 구조물을 보강하는 방안을 제시하는 내용이 주류를 이루었다(Dawson et al., 2011). 하지만 구조물을 신설하거나 기존 구조물을 보강해 기상재해 발생의 원인을 제거하는 방안은 예산 제약 아래 현실적인 수단이 되기 어렵다. 달리 말하면, 전자에 속하는 수단만으로 기상재해로 인한 경제적 손실 및 인명 피해를 충분히 저감하는 데 현실적인 한계가 있으므로 후자에 속하는 노력도 경주되어야 한다.

이런 노력의 일환으로 대표적인 기상재해인 홍수에 따른 침수 시 인명 피해의 저감을 위해 본 논문에서는 침수 예상

\* Corresponding author: Kim, Byungil, Department of Civil Engineering, Andong National University, Gyeongsangbuk-do 36729, Republic of Korea  
E-mail: bkim@anu.ac.kr  
Received January 7, 2016; revised February 4, 2016  
accepted February 26, 2016

지역 및 그 시간을 모의하는 시뮬레이션 모형을 행위자 기반 모델링(agent-based modeling)을 이용해 개발하고자 한다. 행위자 기반 모델링은 일종의 계산적 방법으로 특정 환경 안에서 개개의 객체들과 그들의 상호작용을 다양한 행위 규칙들을 이용해 직접적으로 모의할 수 있다(Gilbert, 2008; Son et al., 2014; Kim et al., 2015a). 하천 수위가 제방보다 높아지면 하천의 물은 도시로 흘러들게 되는데 이 물은 주변 지형, 지물 및 수위 등을 복합적으로 고려해 사방으로 전파된다. 이런 전파 양상은 물과 주변 환경의 상호작용을 규칙화함으로써 표현이 가능하므로 행위자 기반 모델링의 적용 전제에 잘 부합한다고 볼 수 있다.

Hobeika and Jamei (1985) 및 Johnstone et al. (2005) 역시 행위자 기반 모델링을 사용해 재난관리를 목적으로 침수 예상 지역을 도시하였으나 단순히 확률적인 위험도 분석에 근거할 뿐 물의 전파 양상을 수리학적으로 고려하지 못하였다. Dawson et al. (2011)은 수리학적으로 좀 더 진일보한 결과를 제시하였으나 주요 변수를 선언적으로 사용함에 따라 그 해석적인 의미가 간과되고 있다. 따라서 본 연구는 시간에 따른 침수 예상 지역을 합리적으로 산정하기 위해 행위자 기반 모델링의 주요 변수들에 수리학적 근거를 부여하고자 한다.

본 연구는 모형의 설계부터 검증까지 일련의 과정을 체계적인 절차에 따라 설명하기 위해 ODD(Overview, Design concepts, and Details)를 활용한다. ODD는 행위자 기반 모델링을 활용해 개발한 시뮬레이션 모형을 타인이 손쉽게 이해하고 재현하기 위한 일종의 모형 설명 규약이다(Grimm et al., 2006). 이런 ODD 규약에 따라 대표적인 행위자 기반 모델러인 NetLogo(Wilensky and Rand, 2015)를 활용해 시뮬레이션 모형을 구현한다.

## 2. 시뮬레이션 모형의 개요

### 2.1 대상 지역

본 연구는 시뮬레이션 모형의 대상 지역으로 안동 도심지가 가로 약 2km 및 세로 약 0.9km(Fig. 1의 중앙부)를 선정하였다. 안동시는 경상북도 중북부에 있는 시이며 도심지의 지근거리에 안동댐(Fig. 1의 오른쪽 상단)이 위치한다. 안동댐은 높이 83m, 길이 612m의 중앙차수형 토석댐(earth core rock-fill dam)이다. 이 댐은 총저수용량 1,248백만 $m^3$  규모로 계획되었으며, 1971년 착공해 1977년부터 현재까지 운영되고 있다.

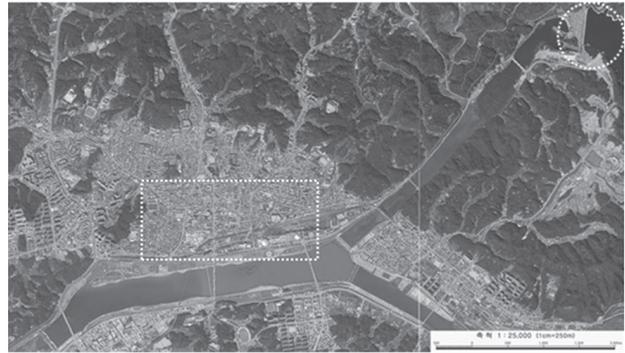


Fig. 1. Satellite image of Andong and Andong Dam

댐과 같은 대규모 수공 구조물들은 일반적으로 PMF(probable maximum flood, 가능최대홍수량)를 이용해 설계한다. 설계홍수량을 초과하는 물이 댐에 유입되면 월류에 의한 댐 붕괴를 초래할 수 있으므로 해당 지역의 PMF를 산정해 설계의 기준으로 삼는다. 안동댐의 경우 1971년에 착공되었으므로 PMF를 산정한 시점은 그 이전이다. 구체적으로 말하면, 설계 시점에 산정한 안동댐의 수문학적 안전성 검토 기준(즉, PMF)은 기록적인 태풍 루사(2002년), 매미(2003년) 등을 경험한 현재의 그것에 미치지 못할 수 있다. 예를 들어, 건설교통부의 조사에 따르면 1977년 안동댐 유역의 PMF는  $8,350m^3/s$ 이었으나 2004년의  $15,100m^3/s$ 까지 약 1.8배 증가하였다(MOCT, 2005). 만약 댐의 저수량 또는 방류량을 증대하지 못하면 댐 붕괴와 같은 재앙이 발생할 수 있다는 문제의식 아래 개착식 비상 여수로를 2014년에 준공하였다. 이를 통해 안동댐의 수문학적 안전성은 확보하였으나 강화된 방류능력으로 인해 안동댐 하류부(즉, 안동 도심지)의 침수 위험은 오히려 증가하였다. 실제로, 안동댐의 방류량을 산정한 Kim et al. (2014)의 분석 내용을 확장해 홍수와 해석을 하면 PMF가 안동댐에 유입 시 직하류 지점에서 수면표고(water surface elevation)는 94,86m까지 상승할 수 있다. 이 수치는, 만약 제방 붕괴와 같은 이차적인 재해까지 발생하면, 도심지 상당 부분의 침수를 야기할 수 있는 정도이다.

### 2.2 시뮬레이션 모형의 목적

본 연구를 통해 개발하고자 하는 시뮬레이션 모형의 목적은 전술한 시나리오(즉, 수면표고 94,86m 상승)에 따라 안동도심지 하부의 하천이 범람하는 경우 침수 예상 지역 및 그 시간을 모의하는 것이다. 이 목적은 기존의 유사 연구 성과만으로 달성이 어렵다. 전술한 Kim et al. (2014)의 연구 결과를 바탕으로 해당 지역의 수치지도 및 그 수치표고모형(digital elevation model)을 활용하면 수면표고 94,86m 이하인 지역을 도시할 수 있고, 이를 통해 침수 예상 지역을 모의할 수 있다. 하지만 이 결과만으로는 지점별 침수 예상 시간을 알 수 없으므로 대피 장소 및 동선 선정에 실효성 있는 자료로 활용

이 불가하다. 침수가 발생할 수 있다는 경고를 해당 지역의 주민들이 인지하지 못하는 경우가 허다하며(Parker et al., 2007), 인지하더라도 적절한 대처를 하지 못하는 경우도 빈번하고(BMRB, 2001), 교통약자<sup>1)</sup>의 이동속도는 정상치의 약 60% 수준에 불과하다는 국토교통부의 조사(MLIT, 2009) 등을 고려하면 침수예상지도를 작성하는 것만으로 실효성 있는 비상대처계획을 수립할 수 있다고 보기 어렵다. 따라서 상당수 인원이 침수 예상 지역 밖으로 이동이 불가하다는 점을 고려해 이 지역 안에 대피 장소 및 동선을 설정하는 것이 현실적인 대안이 될 수 있다. 이를 위해서는 침수 예상 지역 및 그 시간을 동시에 모의할 수 있어야 한다. 이것이 본 시뮬레이션 모형의 목적이다.

### 2.3 상태 변수

NetLogo는 움직이는 행위자들, 격자 형태로 배치된 움직이지 않는 행위자들 및 이들 사이의 상호작용을 규칙들로 모의할 수 있는 일종의 프로그램 가능한 모델링 환경이다. 본 연구에서 움직이는 행위자들은 지표면 흐름에, 움직이지 않는 행위자들은 지형에 해당한다. 이는 대상 지역인 안동 도심지를 격자로 구분해야 함을 뜻하며, 격자 위에 존재하는 지표면 흐름은 직육면체 형태로 전파됨을 시사한다. 본 연구는 이와 같은 전파 양상을 산정하기 위한 대표적인 방법인 연속방정식(Continuity Equation)과 Manning 공식(Manning's Equation)을 이용한다. 연속방정식 및 Manning 공식은 각각 식(1) 및 (2)와 같다.

$$Q = AV \tag{1}$$

*Q*: discharge,  $m^3/s$   
*A*: cross-sectional area,  $m^2$   
*V*: average velocity,  $m/s$

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

*n*: Manning's roughness coefficient,  $s/m^{1/3}$   
*R*: hydraulic radius,  $m$   
*S*: slope of the hydraulic grade,  $m/m$

식(1)에 식(2)를 대입하고 단면적 *A*와 동수반경 *R*을 유로폭 *W*와 격자 낙차 *h*로 치환하여 정리하면 식(3)을 얻는다.

$$Q = AV = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{n} Wh^{\frac{5}{3}} S^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

*W*: width,  $m$

이때, 격자의 형태가 정방형일 경우 유로폭(*W*)은 격자 간격과 같으며 동수경사(*S*)는 물이 전파되는 두 격자 간의 낙차

를 격자 간격으로 나눈 값이 된다. 최종적으로 구한 유량에 그 전파시간 *t*를 곱하면 물의 용적을 구할 수 있고 이를 격자의 단면적으로 나누면 표고 변화량을 산정할 수 있다.

본 시뮬레이션 모형의 주요 상태 변수들은 연속방정식과 Manning 공식의 변수와 일치하며 이 값들은 격자의 형태 및 간격과 밀접한 관련이 있다. 즉, 조도계수(*n*), 격자 간격(*W*), 격자 낙차(*h*) 및 전파시간(*t*)이 본 시뮬레이션 모형의 주요 상태 변수들이다.

### 2.4 모형 축척

모형 축척이 클수록 시뮬레이션 모형상의 한 격자에 대응하는 실제 면적은 좁아지므로 좀 더 사실적인 모의가 가능한 반면 늘어난 격자의 수만큼 계산 효율은 감소한다. 예를 들어, 시뮬레이션 모형에서 지형을 표현하기 위한 데이터 구축을 위해 1:50,000 수치지형도를 선택하면 그 수치표고모형의 해상도는 20m가 되고 이는 곧 격자 간격이 된다. 1:1,000 수치지형도의 경우 1m가 된다. 후자의 경우 같은 면적을 표현하기 위해 400배 더 많은 격자를 활용해야 하므로 그만큼 계산 효율을 감소한다. 이에 본 연구는 1:5,000 수치지형도에서 수치표고모형을 추출해 격자 한 변의 길이를 5m로 설정하였고 기술적인 과정은 아래와 같다.

수치표고모형 생성을 위한 기초자료 취득에는 항공라이다 데이터, 고해상도 위성영상이 이용되나, 데이터 취득의 어려움과 고비용으로 인해 GIS 소프트웨어를 이용하여 기존의 수치지형도를 수치표고모형으로 변환하는 방법이 일반적으로 사용된다. 수치지형도는 기본적으로 등고선, 도로, 건물 및 행정경계 등 다양한 정보를 포함하고 있다. 여기서 수치표고모형 데이터를 구축하기 위해서는 표고점의 정보를 지니고 있는 등고선 데이터만을 추출해야 한다. 등고선 정보로부터 수치표고모형을 직접 생성할 수도 있지만 이 경우 단순하거나 복잡한 지형을 동일 격자 크기로 표현해야 하므로 변이가 심한 지면의 상태를 정확하게 표현하지 못하는 단점을 갖고 있다. 반면에 불규칙하게 분포된 지형의 표고를 삼각형 형태로 표현하는 불규칙 삼각망(triangulated irregular networks)은 삼각형을 구성하는 선분의 길이 변화를 통해 평야나 강 같은 단순한 지형은 자료의 밀도를 낮추고, 계곡이나 골짜기 등은 자료의 밀도를 높임으로써 지표면의 형태를 비교적 정확하게 기록할 수 있으므로 수치표고모형 생성을 위한 전 단계로 이용된다. 불규칙 삼각망은 등고선을 구성하는 polyline 각 선분의 3차원 좌표를 활용해 생성할 수 있다. 정규화 된 2차원 배열의 수치표고모형격자를 생성하고 그 위에 불규칙 삼각망으로 생성된 3차원 삼각형을 수직 정사하여 *Z* 값을 구함으로써 수치표고모형의 격자 고도값을 생성할 수 있다(Park et al., 2007). 본 연구에서는 수치표고모형 생성을 위한 입력 자료로 2013년에 촬영된 안동 지역의 1:5,000

1) 장애인, 고령자, 임산부, 영유아를 동반한 사람, 어린이 등 일상생활에서 이동에 불편을 느끼는 사람

수치지도 세 개의 도엽을 부분적으로 사용하였고, 수치표고 모형 생성에는 ArcGIS 10.1 소프트웨어를 활용하였다.

모형 축척에 대해 간단히 정리하면, 수치표고모형의 격자 간격은 입력 데이터인 수치지형도의 등고선 간격으로 결정되며 본 연구에서는 1:5,000 수치지형도의 등고선간격인 5m를 따라 수치표고모형의 격자 간격을 5m로 지정하였다. 따라서 본 연구의 대상 지역인 약 1,80km<sup>2</sup>의 안동 도심지는 NetLogo상에서 한 번이 5m인 정방형 격자 총 72,581(=401×181)개를 통해 Fig. 2와 같이 표현된다.



Fig. 2. Digital elevation map of Andong in NetLogo

Fig. 2에서 갈색(최저 표고 88.6m)에 가까울수록 표고가 낮으며 흰색(최고 표고 146.7m)에 가까울수록 표고가 높다. 이런 체계를 통해 전반적으로 위쪽(즉, 도시 북부)으로 갈수록 표고가 높아지고 있음을 확인할 수 있다.

### 2.5 프로세스 개요

안동댐에 PMF가 유입되면 비상 여수로를 포함한 모든 문비를 개방해야 한다. 이는 안동 도심지 남쪽 하천의 수면 표고를 94.86m까지 상승시킬 것이다. 이때 제방이 붕괴되는 이차적인 재해가 발생해 물이 도심지로 유입되면 표고가 88.6m부터 146.7m까지 분포하는 대상 지역은 부분적으로 침수될 것이다. 지대가 낮은 남부(Fig. 2의 어두운 영역)부터 높은 북부(Fig. 2의 밝은 영역)로 침수 면적이 확장될 것이다. 지표면 흐름의 모델링 방법에 대한 선행 연구에 따르면 한 방향 전파만으로도 현상을 충분히 모사할 수 있다(Vieux and Vieux, 2002; Hong et al., 2006; Park and Kang, 2006; Park et al., 2007). 이에 본 시뮬레이션 모형은 계산 효율까지 고려해 최급경사 방향 전파만 고려한다.

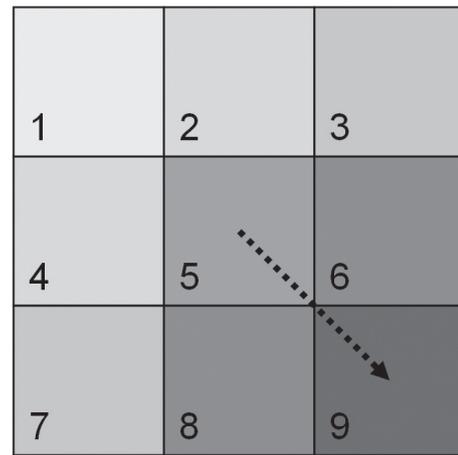


Fig. 3. Floodplain flow between patches

예를 들어, Fig. 3에서 5번은 이미 침수되었고 1-2/4-3/7-6/8-9 순서로 표고가 낮아지는데 5번의 수면표고가 9번의 표고보다 높다면 1, 2/4, 3/7 및 6/8의 표고와 관계없이 물은 5에서 9로만 흐른다. 이때 유량 변화(즉, 수심 변화)는 식(3)의 지배를 받는다. 구체적인 지표면 흐름의 과정은 다음과 같다.

① 흐름 방향을 결정한다. 침수된 격자를 중심으로 인접한 8개의 격자 중에서 가장 표고/수면표고가 낮은 하류 격자를 선정한다.

② 유량 및 수심을 산정한다. 이때 수심이 증가한 격자의 수면표고는 물을 공급한 격자의 그것보다 높을 수 없을 뿐만 아니라 94.86m 이하여야 한다.

③ 침수된 격자의 수가 늘어나지 않으면 시뮬레이션을 멈춘다.

상술한 과정을 간단히 도식화 하면 Fig. 4와 같다.

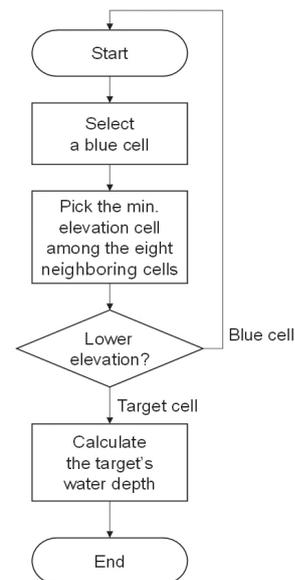


Fig. 4. Inundation routine

침수된 모든 격자에 대해 Fig. 4의 과정이 끝나면 시간을 1 초 증가시키고, 같은 과정을 처음부터 다시 시작한다.

### 3. 시뮬레이션 모형의 상세

#### 3.1. 조도계수

본 시뮬레이션 모형의 주요 상태 변수들은 식(3)의 변수와 일치하며 이 중 격자 간격(W)은 모형 축척을 1:5,000으로 선택함에 따라 이미 결정되었고, 격자 낙차(h)의 초기값은 수치 지형도 및 Kim et al. (2014)에 의해 주어졌다. 나머지 상태 변수 중 하나인 조도계수(n)는 선행 연구 결과에 따라 결정하였다.

조도계수는 수로나 범람원에서 홍수 유출에 대한 저항을 나타내는 값으로 물이 흐르는 표면의 특성과 밀접한 관련이 있다. Chow(1959)는 다양한 표면에 대한 평균적인 조도계수를 제안하였고 이 값들이 현재에도 가장 널리 통용되고 있다. 특히 단면형이 균일하고 수로의 재료적 물성이 단일한 경우에 적합한 것으로 알려져 있다. 하지만 자연하천과 같이 단면형은 물론 경계면의 재질이 다양한 경우에는 신뢰성 있는 결과를 확보하기 어렵다. 흐름 조건별로 조도계수를 정확하게 구하는 것은 현재의 지식체계 안에서 가능하지 않다. 게다가 본 연구와 같이 하도가 아닌 범람원에 대한 조도계수를 해석적으로 산정한다는 것은 불가능에 가깝다. 실제로, 조도계수는 평탄지형의 경우 0.011(콘크리트 지역)부터 0.8(산림 지역)까지 다양하게 변화한다(USDA 2010). 이에 본 연구에서는 대상 지역과 유사한 특성을 가진 청미천 유역을 중심으로 조도계수를 0.05부터 0.65까지 변화시켜 실측유량과 비교한 결과 0.34가 해당 지역에 가장 적합한 조도계수임을 제안한 Shin(1996)의 결과를 차용하였다.

#### 3.2. 전파시간

물의 흐름은 하류 격자들 중 최급경사인 격자로 전파된다. 이 과정에서 다음과 같은 연속방정식이 성립해야 한다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{4}$$

$x$  : distance, m

식(3)을  $x$ 에 대해 미분하면 식(5)를 얻는다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{5}{3} \frac{W}{n} h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \frac{\partial h}{\partial x} \tag{5}$$

식(5)를 식(4)에 대입하면 식(6)을 얻는다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{5}{3n} h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \tag{6}$$

식(6)에서  $h$ 에 대한 전미분은 식(7)과 같다.

$$dh = \frac{\partial h}{\partial t} dt + \frac{\partial h}{\partial x} dx \tag{7}$$

식(7)의 양변을  $dt$ 로 나누면 식(8)을 얻는다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{dx}{dt} \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{dh}{dt} \tag{8}$$

식(6)과 식(8)을 이용하면 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{5}{3n} h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \tag{9}$$

식(3)을  $h$ 에 관해 정리하고 식(9)에 대입하면 최종적으로 식 (10)을 얻는다.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{5Q^{0.4} S^{0.3}}{3W^{0.4} n^{0.6}} \tag{10}$$

식(10)을 이용해 격자 간격 5m인 경우 조도계수와 유량별 전파시간을 계산하면 Table 1과 같다.

Table 1. Variation in travel times for manning's roughness coefficients and discharge

Q (m <sup>3</sup> /s)	Travel time (sec)				
	n=0.2	n=0.3	n=0.34	n=0.4	n=0.5
50	1.12	1.42	1.54	1.69	1.94
100	0.85	1.08	1.16	1.28	1.47
200	0.64	0.82	0.88	0.98	1.11
300	0.55	0.70	0.75	0.83	0.95
400	0.49	0.62	0.67	0.74	0.84
500	0.44	0.57	0.61	0.67	0.77

유량이 감소할수록 전파시간은 증가하게 되므로 수면표고가 94.86m에 근접할수록 침수되기까지 걸리는 시간도 늘어 나게 된다. 따라서 표고가 높은 북쪽으로 갈수록 같은 면적이 침수되기까지 소요되는 시간은 증가할 것으로 예상된다.

### 4. 시뮬레이션 결과

전술한 모형 설계를 바탕으로 NetLogo 5.2를 이용해 안동 도심지의 침수 예상 지역 및 그 시간을 모의할 수 있는 시뮬레이션 모형을 개발하였다.

Fig. 5는 물이 제방을 넘어 도시 북부로 전파되는 양상을 시간별로 보여준다. 여기서 노란색은 등위도 지역을 뜻하는데 이 지역이 95초 경과 후에 최초 침수되고(Fig. 5(b)의 점선 원), 전부 침수되기까지 177초가 소요된다.

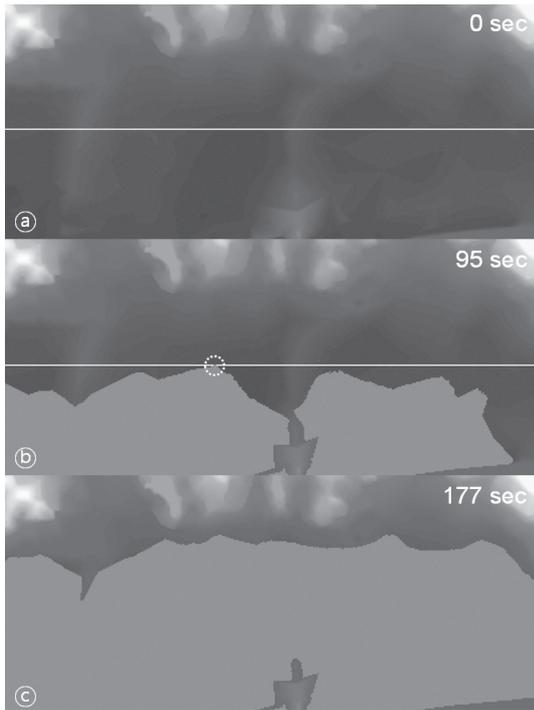


Fig. 5. Simulation state: (a) at 0 sec; (b) at 95 sec; (c) at 177 sec

이처럼 등위도 지역이라 할지라도 침수 예상 시간에 편차가 크기 때문에 대피 장소 선정 시에 이를 고려해야 한다. 한편, 95초가 지나면 대상 지역의 약 33% (=24,253/72,581)가 침수되고 이는 표고가 94.86m 이하인 지역의 약 46% (=24,253/52,811)에 해당한다. 177초의 경우 약 66% (=47,994/72,581)와 약 91% (=47,994/52,811)에 달한다.

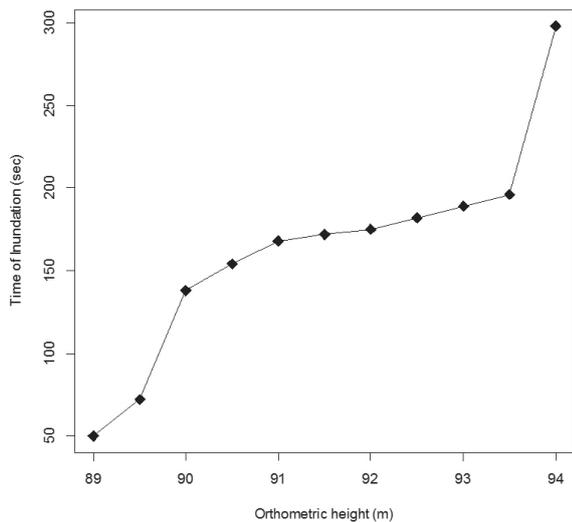


Fig. 6. Time of inundation for orthometric height

Fig. 6는 표고별로 모든 셀이 침수되기까지 예상 시간을 보여준다. 전술한 바와 같이 유량이 감소할수록(즉, 표고가 높

아질수록) 전파속도는 감소하게 되므로 침수 예상 시간은 늘어나게 된다. 하지만 Fig. 6에서 제방 월류 초기에 침수 예상 시간이 긴 이유는 침수 면적이 상대적으로 넓기 때문에 발생한 현상이다. 이와 달리 후기에 침수 예상 시간이 긴 이유는 유량이 감소함에 따라 전파시간이 길어지기 때문이다.

한편, 표고 93m 이하인 지역의 침수 예상 시간에 대해 조도계수를 이용해 민감도 분석을 수행하였다. 조도계수가 0.1 및 0.5인 경우 침수 시간이 각각 186초 및 192초로 예상되었으나 유의미한 차이로 보기 어렵다. 대상 지역으로 무제한에 가까운 물이 유입되기 때문에 조도계수의 변화가 침수 예상 시간에 미치는 영향이 미미한 결과가 도출되었다고 볼 수 있다.

제방 월류가 발생하고 난 뒤부터 해당 지역 주민들이 약 200초 안에 전부 대피하는 일은 물리적으로 불가능에 가까우므로 사전에 위험을 충분히 고지해 선제적인 대피를 유도해야 하는 동시에 침수 예상 지역 안에 대피 장소를 설치해야 할 것이다.

## 5. 결론

본 연구는 행위자 기반 모델링을 이용해 침수 예상 지역 및 그 시간을 모의하는 시뮬레이션 모형을 안동 도심지를 대상으로 개발하였다. 제방을 월류한 물은 주변 지형 및 수위 등과 같은 다양한 조건들에 따라 침수 예상 지역 및 그 시간이 달라질 수 있고, 기존의 침수 예상 지도만으로 실효성 있는 대피 장소 및 동선 선정이 불가하다는 점들이 모형 개발의 주요 동기였다. 물의 전파 양상은 연속방정식과 Manning 공식에 의해 지배받는다는 점을 고려해 모형을 설계하였다. 현상을 사실적으로 모델링하기 위해 연속방정식을 이용해 조도계수와 유량별 전파시간을 산정하였다. NetLogo 5.2를 활용해 개발한 모형은 ODD 규약에 따라 설명하였다. 향후 본 연구 결과를 활용함으로써 주어진 강우 사상 아래 특정 지점이 침수되기까지 걸리는 시간을 과학적으로 산정할 수 있을 것이다. 나아가 대피 장소 및 동선 선정에 기초 자료로 활용이 가능할 것이다.

본 연구에서는 물과 상호작용을 하는 대상으로 지형만을 고려하였으나 건물 및 도로 등과 지물도 물의 전파 양상에 영향을 줄 수 있다. 또한 복잡한 지형과 지물 사이에서 물이 전파되기 위해서는 본 연구와 달리 복수의 방향으로 물이 전파되어야 할 것이다. 본 연구가 차용한 조도계수는 타 지역에서 산정된 것이므로 실제 대상 지역과는 차이가 있을 수 있을 뿐만 아니라 다양한 지표면을 세부적으로 고려하지 않고 단일한 값을 사용했다는 한계가 있다. 이러한 점들을 고려해야 좀 더 신뢰성 있는 침수 예상 지역 및 그 시간을 산정할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2016RIC1B1009711).

## References

- BMRB (2001). *Flood Warning Dissemination: Post Event Survey*, British Market Research Bureau, London, UK.
- Bresch, D. and Spiegel, A. (2011). *A Blueprint for Managing Climate Risks in Emerging Markets*, Zurich, Switzerland: Swiss Re.
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Company, New York, NY.
- Dawson, R. J., Peppe, R., and Wang, M. (2011). "An agent-based model for risk-based flood incident management," *Natural Hazards*, 59(1), pp. 167-189.
- ECA Working Group (2009). *Shaping Climate-Resilient Development: A Framework for Decision-Making*, Economics of Climate Adaptation Working Group.
- Gilbert, N. (2008). *Agent-Based Models*, Sage Publications, CA, USA.
- Grimm, V., Berger, U., Bastiansen, F., Eliassen, S., Ginot, V., Giske, J., Goss-Custard, J., Grand, T., Heinz, S., Huse, G., Huth, A., Jepsen, J. U., Jorgensen, C., Mooij, W. M., Muller, B., Pe'er, G., Piou, C., Railsback, S. F., Robbins, A. M., Robbins, M. M., Rossmanith, E., Ruger, N., Strand, E., Souissi, S., Stillman, R. A., Vabo, R., Visser, U. and DeAngelis, D. L. (2006). "A standard protocol for describing individual-based and agent-based models," *Ecological Modelling*, 198(1-2), pp. 115-126.
- Hong, J. B., Kim, B. S., and Yoon, S. Y. (2006). "Evaluation of accuracy of the physics based distributed hydrologic model using Vflo™ model." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 26(6B), pp. 613-622.
- Johnstone, W. M., Sakamoto, D., Assaf, H., and Bourban, S. (2005). "Architecture, modelling framework and validation of BC Hydro's virtual reality life safety model." In: Vrijling et al. (eds) *Proceedings of the international symposium on stochastic hydraulics*, 23-24 May 2005, Nijmegen, Netherlands.
- Kim, B., Kim, C., and Kim, D. Y. (2015a). "Agent-based evacuation simulations of road tunnels in the event of a fire." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 35(5), pp. 1157-1163.
- Kim, B., Shin, S. C., and Kim, D. Y. (2014). "Resilience assessment of dams' flood-control service." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 34(6), pp. 1919-1924.
- Kim, D.-Y., Kim, S.-B., and Kwak, H.-J. (2013). "Performance Evaluation System Framework for Natural Disaster Research and Development Projects." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 14(4), pp. 118-129.
- MLIT (2009). *Installation and Management Guideline of Disaster Prevention Facilities for Road Tunnels*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong-si, Republic of Korea (in Korean).
- MOCT (2005). *Report on Improving the Hydrologic Safety of Andong Multipurpose Dam*, Ministry of Construction and Transportation, Gyeonggi-do, Republic of Korea (in Korean).
- NEMA (2011). *2010 Disaster Yearbook*, National Emergency Management Agency, Seoul, Republic of Korea (in Korean).
- Park, C., Lee, S., and Suh, Y. (2007). "Development of an Automatic Generation Methodology for Digital Elevation Models using a Two-Dimensional Digital Map." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 10(3), pp. 113-122.
- Park, J.-H. and Kang, B.-S. (2006). "Comparison of runoff analysis between GIS-based distributed model and lumped model for flood forecast of dam watershed." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 9(3), pp. 171-182.
- Park, J.-H., Kang, B.-S., Lee, G.-S., and Lee, E.-R. (2007). "Flood runoff analysis using radar rainfall and Vflo™ model for Namgang Dam watershed." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 10(3), pp. 13-21.
- Parker, D. J., Tunstall, S. M., McCarthy, S. M. (2007). "New insights into the benefits of flood warnings: results from a household survey in England and Wales." *Environmental Hazards*, 7(3), pp. 193-210.

- Shin S. C. (1996). "Runoff analysis using a distributed rainfall-runoff model." *Journal of Korea Water Resources Association*, 29(6), pp. 131-139.
- Son, J., Shin, S.-W., and Yi, J.-S. (2014). "Understanding Collaborative Working Processes within Construction Project Teams Using Agent-Based Modeling and Simulation." *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 15(1), pp. 70-77.
- USDA (2010). *Part 630 Hydrology*, National Engineering Handbook, United States Department of Agriculture, Washington, DC.
- Vieux, B. E. and Vieux, J. E. (2002). "Vflo<sup>TM</sup>: a real-time distributed hydrologic model." *Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*, Las Vegas, NV.
- Wilensky, U. and Rand, W. (2015). *An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social and Engineered Complex Systems with NetLogo*, MIT Press, Cambridge, MA.

---

**요약 :** 전 세계는 기상재해로 인해 막대한 경제적 손실 및 인명 피해를 입고 있다. 특히 우리나라는 홍수에 따른 침수 시 인명 피해가 빈번하다. 홍수에 대한 실효성 있는 비상대처계획을 수립하기 위해서는 시간에 따른 침수 예상 지역을 산정하는 것이 중요하다. 이에 본 연구는 안동 도심지를 대상으로 행위자 기반 모델링을 활용해 침수 예상 지역 및 시간을 산정하였다. 연속방정식과 Manning 공식을 이용해 조도계수 및 유량별 전파시간을 계산하였다. 안동댐에 가능최대홍수량이 유입되면 직하류 지점에서 발생할 수 있는 시나리오를 모델링하였다. 이 결과들에 근거해 시간대별 침수 예상 지역을 도시할 수 있는 행위자 기반 모형을 개발하였다. 이 모형을 활용해 대상 지역의 약 3분의 2가 침수되기까지 3분 가까이 소요된다는 결과를 얻을 수 있었다. 등위도 지역이라 할지라도 침수 예상 시간의 편차가 약 2배까지 발생할 수 있다는 결과 또한 얻을 수 있었다. 본 연구 결과는 대피 장소 및 경로 선정에 실효성 있는 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

**키워드 :** 침수, 행위자 기반 모델링, 재난관리, 기후변화.

---