호우영향예보를 위한 한계강우량 산정 방법 연구

A Study on the Method of Calculating the Threshold Rainfall for Rainfall Impact Forecasting

이석호* · 강동호** · 김병식***

Lee, Suk Ho*, Kang, Dong Ho**, and Kim, Byung Sik***

Abstract

Changes in weather due to climate change cause changes in atmospheric phenomena such as heavy rains and typhoons, resulting in various disasters. It is necessary to quantitatively analyze the damage caused by these events. In this study, the effect of rainfall in a specific area was analyzed and the secondary damage caused by flooding due to actual rainfall was predicted. The target area was divided into a 1 km × 1 km grid around Sadang Station, which suffered flooding damage due to heavy rainfall in 2011. Analysis of the secondary disaster was limited to urban flooding in the vicinity of Sadang Station, and a model coupling the distributed rainfall-runoff (S-RAT) and inundation (FLO-2D) models was used to analyze urban flooding. In addition, the minimum amount of rainfall (critical rainfall) needed to cause damage to each object was calculated by dividing the analyzed objects into categories of people, vehicles, and facilities. The damage stage was classified into four rainfall impact levels using the critical rainfall and damage stage as a function of time classified based on the heavy rain that occurred around the 2011 Sadang-dong and Seocho-dong stations in Seoul.

Key words : S-RAT, FLO-2D, Coupling Method, Critical Rainfall, Rainfall Impact Level

요 지

기후변화에 따른 기상 변화는 호우, 태풍 등 기상현상의 변화를 가져오고 이로 인한 다양한 재해가 발생하고 있다. 또한 그 피해규모도 커지고 있어 이에 대한 정량적인 분석이 필요하다. 본 연구에서는 특정지역에서 강우량이 미치는 영향을 분석하여 실제 강우로 인한 2차 피해 중 침수로 인한 피해를 예보하고자 하였다. 침수심을 산정하기 위하여 10~200 mm의 강우를 10 mm간격으로 증가시켜 강우량에 따른 침수심자료를 생산하고 이를 이용하여 강우량-침수심관계곡선식을 개발하였다. 개발된 곡선식을 이용하여 특정 침수심(10, 20, 50 cm)을 유발시키는 강우량(한계강우량)을 산정, 산정된 한계강우량을 기준으로 대상지역에 호우침수피해 예보를 실시하였다. 대상지역은 2011년 집중호우로 인해 침수피해를 받은 사당역 주변을 대상으로 각 지역을 1 km × 1 km의 격자로 구분하였다. 2차 재해의 분석 대상은 사당역 주변에서 발생한 도시침수로 한정하였으며, 도시침수를 분석하기 위하여 강우-유출모형(S-RAT)과 홍수범람모형(FLO-2D)의 모델 커플링 기법을 이용하였다. 또한 재해의 대상을 사람, 차량, 시설물로 구분하여 각 대상에 피해를 유발할 수 있는 강우량(한계강우량)을 산정하였다. 또한 한계강우량을 이용하여 피해 단계를 4단계로 구분(호우영향레벨)하였으며, 실제 2011년 7월 사당동과 서초동 일대에 발생했던 집중호우를 기준으로 시간에 따른 피해 단계를 구분, 침수심과 호우영향레벨에 의한 예보결과와 비교분석하였다.

핵심용어 : S-RAT, FLO-2D, 커플링 기법, 한계강우량, 호우영향레벨

*정회원, 강원대학교 방재전문대학원 도시환경방재전공 연구교수(E-mail: esoco@kangwon.ac.kr)

Member, Ph.D. Research Professor. Department of Urban environment & Disaster management, Kangwon National University

**정회원, 강원대학교 방재전문대학원 도시환경방재전공 박사과정(E-mail: kdh@kangwon.ac.kr)

Member, Ph.D Candidate. Department of Urban environment & Disaster management, Kangwon National University

***교신저자, 정회원, 강원대학교 방재전문대학원 도시환경방재전공 부교수(Tel: +82-33-570-6819, Fax: +82-33-570-6458, E-mail: hydrokbs@kangwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor. Department of Urban environment & Disaster management, Kangwon National University

1. 서 론

최근 우리나라는 기후변화에 따른 기상의 변화로 인하여 다양한 재해가 발생하고 또한 그 피해규모도 커지고 있다. 기상 현상과 사회경제적 영향 상관성 분석 결과 가장 많은 횡수와 가장 큰 규모의 피해를 일으키는 재해는 기상재해이며, 이 기상재해를 발생시키는 기상현상은 호우와 태풍이다(Korean Meteorological Society, 2016). 또한 호우와 태풍의 공통 기상요소는 강우(강수)이다. 따라서 우리나라의 자연 재해는 강우로 인한 재해가 가장 많이 발생하고 있으며, 그러므로 강우를 미리 예측하여 이에 대한 대비를 함으로써 재해에 대한 피해를 최소화 할 수 있다. 현재 기상청에서는 미래 강우정보를 예측하기 위하여 앙상블 예측 기법을 이용하고 있다. 앙상블 예측이란 단일 수치예보가 가지는 결정론적인 예측의 한계를 보완한 것으로 초기조건, 물리과정, 경계조건 등이 다른 여러 개의 모델을 수행하여, 확률적으로 미래를 예측하는 시스템이다(KMA, 2012). 이를 이용하여 현재 기상청에서는 단기, 중기, 장기예보, 동네예보, 전국예보, 특보 등 다양한 형태로 강우에 대한 예보를 실시하고 있다. 하지만 현재 예보의 가장 큰 단점은 강우량의 절대값만을 예보하기 때문에 지역적 특성을 고려하지 못한 호우예보가 이루어지고 있다는 것이다. 물론 시설물을 보호하고, 하천범람에 유의하고, 침수에 대비하라는 부가적인 예보를 진행하고 있지만 이를 정량적으로 제시하지는 못하고 있는 실정이다.

이를 위하여 WMO는 이미 재해 영향을 파악하여 예보서비스에 관한 가이드라인을 구축하였으며, 각국 기상청에 영향예보의 중요성을 강조하고 있으며. 영국과 미국을 비롯한 기상 선진국에서는 이미 ‘영향예보’를 부분적으로 실시하고 있다(Kim, 2016; Yeh, 2017). 영국의 홍수예측센터(Flood Forecasting Centre, FFC)에서는 홍수 영향예보를 위한 사용자 매뉴얼을 만들었으며 홍수위험매트릭스를 만들어 홍수 위험단계를 4단계로 구분하였다(FFC, 2017). 또한 영국에서는 격자단위의 홍수영향예보를 실시하고 있으며 홍수 모의를 위해 분포형 모형인 Grid to Grid (G2G) 모형을 이용하여 격자단위의 영향예보를 실시하고 있다(Cranston, M. et al., 2012; Price et al., 2012; Cole, 2018).

국내에서도 최근 영향예보를 위한 연구가 추진중에 있다. Kim et al. (2017)은 영향예보의 특징에 관하여 설명하고, 기상선진국의 영향예보 도입 현황 및 사례를 분석하였으며, MOLIT (2016)에서는 국민의 홍수에 대한 안전도 강화 및 국가 재난 대응능력 향상을 위한 홍수예보 기술에 영국의 영향예보의 홍수위험매트릭스 방법을 도입하였다. Lee (2017)는 강남지역의 홍수피해사례를 중심으로 침수피해를 일으키는 한계강우량을 추정하였다.

영향예보를 위한 강우량 산정시, 실제 내리는 강우도 물론 중요하지만, 강우는 지형 즉 그 지역의 특성(하천,

산지, 도심지)과, 토지이용, 토양에 따라 그 유출량의 차이가 크게 나타나고 있으며, 그 지역의 배수관리체계에 따라 도시침수, 산사태, 홍수범람과 같은 다양한 2차 피해를 유발할 수 있다. 같은 유출량이라도 그 유출량이 미치는 영향은 지역 및 시기에 따라 다르게 나타날 수 있다. 이렇듯 같은 강수량이라도 그 지역적 특성에 따라 발생하는 재해의 형태와 규모는 크게 다를 수 있으며, 따라서 강수로 인한 2차 3차적인 재해의 특성을 파악한다면 강우량에 국한된 예보가 아닌 실제 피해에 대한 영향예보가 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 특정지역에서 강우량이 미치는 영향을 분석하여 실제 강우로 인한 2차 피해 중 침수로 인한 피해를 예보하고자 하였다. 대상지역은 2011년 집중호우로 인해 침수피해를 받은 사당동 및 서초동 지역 중 침수 피해가 발생한 3곳을 대상으로 각 지역을 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 의 격자로 구분하여 각 지역의 특정 침수심을 유발시키는 한계강우량을 산정하였다. 한계강우량을 산정하기 위하여 강우-유출모형(S-RAT)과 홍수범람모형(FLO-2D)의 모델 커플링 기법을 이용하였다. 산정된 한계강우량을 이용하여 강우량에 따른 예보 단계를 4단계로 구분하였으며, 실제 2011년 사당동 및 서초동 주변에 발생했던 집중호우시나리오를 적용, 시간에 따른 한계강우량과 침수심을 기준으로 침수영향예보와 실제 침수사례를 비교 분석하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 지역별로 일정 침수를 유발시키는 강우량을 산정하여 집중호우로 인한 위험 영향을 시간에 따라 등급화하여 제시하는 방법을 개발하는 것이다. 대상지역 중 호우피해가 발생했던 격자에서 최저표고를 침수의 시작지점으로 정의하고 최저표고에서의 유출량을 산정하여 유출량을 홍수범람모형의 입력자료로 사용하여 침수분석을 실시하여 침수심-강우량관계곡선식을 개발한다. 개발된 강우량-침수심 곡선을 이용하여 특정 침수심을 유발시키는 한계강우량을 생산한다. 한계강우량 대상격자는 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 의 격자이나 유출분석은 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 격자내 최저표고점을 기준으로 유역을 분할하여 유출량을 산정, 산정된 유출량을 침수모형에 적용하여 침수심을 산정하였다. 모의 결과를 이용하여 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 격자내의 최대침수심을 적용 강우량-침수심 곡선을 산정하였다. 따라서 한계강우량의 대상격자는 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 이며 강우-유출 및 침수 모의에 적용되는 범위는 대상격자를 포함하는 전체 홍수유역이 된다. 또한 개발된 곡선식을 이용하여 각 격자의 한계강우량을 산정하고 산정된 결과를 강우시나리오를 이용하여 비교 분석한다. 연구절차는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1. Study Flow Chart

3. 이론적 배경

3.1 분포형 강우-유출 모형(S-RAT)

S-RAT (Spatial Runoff Assessment Tool) 모형은 Kim et al. (2010)이 개발한 분포형 강우-유출모형으로 GIS자료를 이용하여 대상유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고 각각의 격자마다 시간간격별 개념적 물수지를 계산함으로써 유역의 시·공간적 유출량 변화를 모의하도록 설계되었다. 또한 대부분의 분포형 수문모형들은 모형에 입력될 지형학적 매개변수들을 추출하기 위해 Arc 관련 소프트웨어 또는 IDRISH 등과 같은 GIS 관련 상용패키지에 의존하나 S-RAT은 자체적으로 매개변수를 추출하여 입력자료가 간소화되어 있다. S-RAT 모형은 각 격자별 침투 및 직접 유출을 산정하기 위해 SCS Curve Number (이하 CN) 방법을 사용하였다. 이를 위해 토양도 및 토지이용도를 입력 받아 CN 값 격자자료를 생성하여 계산하게 된다.

$$S(i,j) = 254 \left(\frac{100}{CN(i,j)} - 1 \right) \quad (1)$$

여기서, $S(i,j)$ 는 잠재보유수량, $CN(i,j)$ 는 격자별 CN 값

$$\frac{P_n[t,(i,j)]}{P[t,(i,j)]} = \frac{F[t,(i,j)]}{HS(i,j)} \quad (2)$$

여기서, $F[t,(i,j)]$ 는 침투저류조의 침투능(water content) (mm); $HS(i,j)$ 는 침투 저류조의 용량

$$I[t,(i,j)] = P[t,(i,j)] - P_n[t,(i,j)] \quad (3)$$

$$W[t,(i,j)] = \frac{F[t,(i,j)]}{HS} \quad (4)$$

$$I[t,(i,j)] - W[t,(i,j)] = \frac{dF[t,(i,j)]}{dt} \quad (5)$$

여기서, $W[t,(i,j)]$ 은 지표하 유출, $P_n[t,(i,j)]$ (mm)는 직접 유출, HS 는 무차원 상수로서 개념적 매개변수이다. Eqs. (3)-(6)을 이용하여 침투저류조의 질량보존 지배방정식을 산정하면 다음과 같다. Eq. (7)은 4차 Runge-Kutta 방법을 이용하여 해석 할 수 있다.

$$\frac{dF[t,(i,j)]}{dt} = -\frac{F[t,(i,j)]}{H_s} - E[t,(i,j)] + P[t,(i,j)] \left\{ 1 - \frac{F[t,(i,j)]}{HS(i,j)} \right\} \quad (6)$$

Fig. 2는 본 모형의 격자 물수지 계산 개념도를 나타낸 것이다.

Fig. 2. Conceptual Diagram of Grid Water Balance (Kim et al., 2010)

Fig. 3. Discharge Flux Across Grid Element Boundaries (FLO-2D Software Inc., 2009)

3.2 분포형 홍수 범람 모형(FLO-2D)

FLO-2D 모형은 1988년에 미국 콜로라도 주의 보험용 도시침수 가능지역을 파악하기 위하여 처음 개발되었다. FLO-2D 모형은 체적을 보존시키면서 홍수의 추적을 재현해내는 모형이다. 기본적으로 지표면 홍수 모의를 시작으로 다양한 지형적 요건, 도시지역의 건물, 교량, 제방등의 유동 장애물, 유동경로에서 손실 등에 대한 구성 요소를 시뮬레이션에 추가할 수 있다. FLO-2D모형은 미국 연방재난관리청(Federal Emergency Management Agency, FEMA) 공인된 모형이므로 신뢰성이 높으며, GDS, MAPPER++ 등이 있어 자동적으로 침수 구간을 구별해낼 수 있다. 또한 그 결과를 그래프로 처리하여 보여주기 때문에 시·공간적인 확인이 용이하다. FLO-2D의 흐름방정식은 Eq. (7)과 같으며, 연속방정식과, 운동량방정식을 기본으로 한다. Fig. 3은 FLO-2D 기본 개념을 나타내고 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V}{\partial x} = i \quad (7)$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

여기서 h 는 유량의 깊이, V 는 시작격자에서 8방향 흐름(x방향) 중 하나의 평균유속이며, i 는 초과강우강도이다. S_f 는 마찰경사로 Manning 방정식을 기반으로 한다.

4. 적용 및 결과

4.1 대상지역

본 논문대상지역은 대한민국 서울의 사당, 방배, 서초동

일대로 2011년 7월 27일 01시부터 23시까지 약 300 mm의 집중호우가 내렸으며, 사당동 사당역 부근과, 서초동 주민센터 및 서울고등학교 일대에서 침수 피해가 발생하였다. 피해를 분석하기 위하여 대상지역을 1 km × 1 km의 격자망으로 구분하였으며 피해가 발생했던 13, 23, 26번 격자를 대상지역으로 선정하여 침수분석을 실시하였다.

Fig. 4. Study Area

4.2 입력자료 구축

강우-유출모형에 서 필요로 하는 자료는 강우량과, 지형자료(DEM, Landuse, Soil map)이다. 서울강우관측소의 지속 시간 3시간의 500년 확률강우량은 243 mm이다(MLTM, 2011). 따라서 강우자료는 20~300 mm를 20 mm 단위로 나누어 총 15종의 강우시나리오를 설정하였다. 그리고 총강우량을 시계열로 분포시키기 위하여 Huff 강우분포방법

(Huff, 1967)을 이용하여 시계열 강우자료 형태로 변환하는 작업을 수행하였다. 여기서 첨두강우량의 발생에 따라 나누어진 Huff의 4분위 중 우리나라의 강우형태를 잘 반영한다고 판단되는 2분위와, 극한상황을 고려할 수 있는 4분위의 중간값인 3분위의 강우분포를 이용하였다. 지속시간 3시간에 대한 3분위 강우시나리오 결과는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5. Rainfall Scenarios with Third Quantile in the Duration of 180 min

대상격자의 지표흐름방향과 지표유출량을 산정하기 위하여 대상격자를 포함하는 소유역을 분할하였으며 분할된 소유

역에서 해상도 30 m × 30 m의 DEM, Landuse, Soil map의 공간정보를 구축하였다. 구축된 공간정보는 Fig. 6과 같다.

FLO-2D를 이용한 침수분석에 필요한 자료는 홍수범람유량과, DEM이다. 홍수범람유량의 강우-유출모형을 이용하여 산정된 유출량을 이용하며, DEM은 강우-유출모형에서 사용된 DEM과 같은 형태의 공간자료를 이용한다.

4.3 강우-유출모형(S-RAT) 적용

설정된 시나리오별 강우량을 이용, S-RAT 모형을 이용하여 Fig. 4의 13, 23, 26번 격자를 포함하는 소유역의 강우-유출 분석을 실시하였다. 소유역의 해상도는 30 m × 30 m로 각 격자별로 유출량을 확인할 수 있다. 영향예보를 위한 기본 단위는 1 km × 1 km이며 격자내에서 침수모형을 적용하기 위한 기준점(범람시작점)을 기준 격자(1 km × 1 km)에서의 최저표고점으로 정의하였다. S-RAT 모형의 경우 유역의 강우-유출 모의가 완료되면 어느 격자에서든 그 격자의 유출을 쉽게 확인할 수 있다. Fig. 7은 13, 23, 26번 격자에서 최저표고를 출구점으로 하여 소유역을 분할한 결과이다. 여기서 산정된 유출량은 홍수범람모형에서의 제내지유입량이 되어 침수분석의 입력값으로 활용된다. 분석대상인 13, 23, 26번 격자의 최저표고점에서의 산정된 시나리오별 유출량은 Fig. 8과 같다.

ID	DEM	Landuse	Soil
13			
23			
26			

Fig. 6. Topographic Data

Fig. 7. Basin for Runoff Model

Fig. 8. Result of Runoff in Study Area

4.4 홍수범람모형(FLO-2D) 적용

침수심을 모의하기 위하여 앞서 산정된 분석대상지점에서의 유출량 값을 시간에 따라 각 격자별 최저표고점에 분포시켰다. 도심지에서 좀 더 정확한 침수모의를 위해서는 강우-유출모형을 통해 산정된 지표유출량에서 하수관망을 통해 배출되는 지하유출량을 제외한 유량을 홍수범람모형의 입력값으로 사용한다. 영국의 영향예보를 위한 침수분석의 경우를 보면 5년 빈도의 홍수량을 홍수방어능력으로 잡아 유출량에서 5년빈도의 홍수방어능력을 제외한 유량을 이용하여 침수분석을 실시하였다. 우리나라의 하수관망의 빈도를 보면 현재 행정안전부의 방재성능목표 강우량을 기준으로 설계가 진행되고 있으나 기존의 관망은 주로 5~15년 빈도로 설계·시공되었다. 또한 연구 대상지역인 사당역 주변의 침수는 관망의 통수능도 부족하였지만 토사, 낙엽 등 맨홀 잔류물 등으로 인하여 관망의 원활한 통수능을 방해한 것도 한 요인이다. 따라서 본 연구에서는 하수관망을 통한 지하유출을 제외하고 지표유출만을 고려하여 침수분석을 실시하였다. Fig. 9는 분석대상지역인 16, 23, 26번

격자의 강우량-침수심 곡선으로 각 시나리오별 강우량과 최종 침수분석을 통한 침수심의 관계를 나타낸 그래프이다. 그림에서 생산된 rating curve를 이용하여 각 요소에 따른 한계강우량을 산정하게 된다.

4.5 한계강우량 산정

강우에 따른 침수로 인한 영향예보를 위해서는 침수로 인해 피해를 받는 대상 및 대상이 피해를 받는 침수심을 결정해야 한다. 본 연구에서는 피해를 받는 대상을 인명, 차량, 건물의 3가지 경우로 정의하였으며 이에 대해 분석을 실시하였다. 인명, 차량, 건물 등의 한계침수심에 대한 자료를 보면, 인구의 경우 보행곤란수심(초등학생 20 cm, 여성 50 cm, 성인 70 cm), 행동한계수심(30 cm)으로 정의하고 있으며(지하공간 침수방지를 위한 수방기준 실무매뉴얼, 2017), 차량의 경우 승용차는 약 20 cm, 트럭의 경우 타이어 높이의 1/2로 정의하고 있다(Lee, 2017). 건물의 경우 예상침수 높이에 따라 방수문 또는 방수판(50 cm)을 설치하도록 하고 있다(MPSS, 2017). 관련 자료들을 종합적으로 고려하

Fig. 9. Rainfall-Depth Curve

Table 1. Calculation of Critical Rainfall and Impact Level

Grid	Rainfall-Depth Curve	Critical Rainfall/Impact Level						
		<	10 cm	~	20 cm	~	50 cm	<
13	$y = 39.092x + 19.09$	Level1	23.0 mm	Level2	26.9 mm	Level3	38.6 mm	Level4
23	$y = 615.25x - 54.33$		17.2 mm		52.4 mm		253.3 mm	
26	$y = 554.51x - 32.89$		22.6 mm		78.0 mm		244.4 mm	

여 호우영향레벨을 4단계로 설정하였다. 1단계는 보행에 불편을 줄 수 있다고 판단되는 0~10 cm로, 2단계는 승용차의 통행불편 높이인 10~20 cm로, 3단계는 시설물 방수판 높이를 고려하여 20~50 cm로 4단계는 시설물 침수를 유발시키는 50 cm이상으로 결정하였다. 그리고 Fig. 9의 강우-침수삼곡선을 이용하여 각 호우영향레벨의 경계를 나타내는 침수심을 유발하는 한계강우량을 산정하였다(Table 1).

4.6 시범지역 적용

임계 강우량을 이용하여 분석 대상지역에 실제 발생했던 강우량을 가지고 비교 분석을 실시하였다. 서울특별시 2011년 7월 26~29일 동안 집중호우로 인해 사망 22명, 부상 39명 등 총 이재민 34,152명이 발생하였으며 건물, 공공시설 등 약 300억의 피해액이 발생하였다. 이 기간 중 7월 27일

01시부터 27일 23시에 발생했던 집중호우는 약 300 mm로 이 비로 인하여 대상지역인 사당동과 서초동 일대에 큰 침수피해를 일으켰다. 따라서 이 기간 동안의 강우자료를 예측강우시나리오로 가정하여 24시간의 호우영향예보를 실시하였다. 예보시간은 매 1시간 간격으로 하였으며 기준 시간부터 3시간 후의 강우를 기준으로 인명, 차량, 건물에 해당하는 한계강우량과 비교하여 호우영향레벨을 산정하였고 산정된 결과와 실제 침수사례를 비교하였다.

서초4동 주민센터 일대(16번 격자; Table 2)의 경우 오전 2시부터 10 cm 이상의 침수심으로 호우영향레벨 2단계에 들어왔으며 9시에 113 cm의 최대침수심이 발생하였으며(호우영향레벨 4단계) 19시 이후에 호우영향예보권에서 벗어났다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 승용차의 상단부까지 침수가 일어났음을 확인할 수 있다.

Table 2. Result of Rainfall Impact Level (GRID 16)

Time	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
Rainfall (mm)	0.57	18.55	27.60	31.70	63.73	55.35	70.05	115.1	160.3	120	78.17	13.69
Depth (cm)	0	13	22	26	58	50	64	109	153	113	72	8
Impact level	-	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	1
Time	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	-
Rainfall (mm)	8.61	31.58	24.56	15.28	23.85	17.49	5.84	5.45	5.59	13.39	0.57	-
Depth (cm)	3	26	19	10	18	12	0	0	0	8	0	-
Impact level	1	3	2	2	2	2	-	-	-	-	-	-

Fig. 10. Target Area and Real Case (GRID 16)

사당동 사당역 일대(23번 격자; Table 3)의 경우 새벽 3시부터 호우영향레벨 2단계로 시작하여 최대 30 cm의 침수심(호우영향레벨 3단계)이 발생하였으며 19시 이후에 호우영향예보권에서 벗어났다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 사당역 주변으로 보행 및 차량이동에 영향을 미친 것을 확인할 수 있다.

서초동 서울고 주변(26번 격자; Table 4)의 경우 오전 1시에 침수심 6 cm로 호우영향예보 1단계로 시작하여 오전 9시 최대 36 cm(호우영향레벨 3단계)의 침수심이 발생하였

으며 23시까지 침수가 유지되었다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 차량이동에 영향을 미친 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

같은 강우가 발생하더라도 지역의 지형조건과 홍수방어능력에 따라 각 지역의 침수심은 다양하게 나타난다. 따라서 특정 지역에서 특정 침수심을 유발하는 강우를 미리 알고 있다면 예측된 강우량을 이용하여 선제적인 피해예보가 가능하다.

Table 3. Result of Rainfall Impact Level (GRID 23)

Time	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
Rainfall (mm)	0.98	14.71	42.14	77.42	60.16	62.90	59.88	115.6	159.3	140.4	85.75	29.15
Depth (cm)	0	9	18	24	21	22	21	27	30	29	24	15
Impact level	-	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2
Time	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	-
Rainfall (mm)	19.70	10.48	14.49	6.35	7.85	7.55	0.00	2.82	1.11	0.00	0.98	-
Depth (cm)	11	6	8	1	3	3	0	0	0	0	0	-
Impact level	2	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-

Fig. 11. Target Area and Real Case (GRID 23)

Table 4. Result of Rainfall Impact Level (GRID 26)

Time	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
Rainfall (mm)	0.70	19.62	31.54	46.55	50.76	59.08	67.00	117.5	166.0	145.1	83.47	18.40
Depth (cm)	6	9	12	14	15	17	18	27	36	32	21	9
Impact level	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	3	1
Time	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	-
Rainfall (mm)	16.66	23.95	18.99	10.45	17.90	10.54	0.00	2.34	4.96	9.09	0.70	-
Depth (cm)	9	10	9	8	9	8	6	6	7	8	6	-
Impact level	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-

Fig. 12. Target Area and Real Case (GRID 26)

본 연구에서는 호우영향예보를 위하여 집중호우로 인해 발생하는 도심지에서의 침수심을 이용하여 피해영향예보를 할 수 있는 방법을 연구하였다. 침수로 인한 피해대상을 인구, 교통, 시설물로 구분하여 각 대상에 따른 침수로 인한 피해기준을 조사 분석하여 피해 현황에 따른 4단계의 Impact Level을 만들었으며, 각 단계의 한계침수심을 유발하는 한계 강우량을 산정하였다. 그리고 사당동 서초동의 피해지역의 실제 강우를 이용하여 실제강우를 예측강우로 가정하여 호우영향예보를 실시하였다. 각 시간에 따른 침수심을 기준으로 한계강우량과 비교하여 호우영향레벨 단계를 부여하였으며 호우영향레벨과 실제 침수피해사례와 비교 분석하였다. 비교 결과 보행불편, 차량침수, 건물침수 등의 결과가 Impact Level 단계에 따라 비슷한 양상을 보이는 것을 확인하였다. 분석대상지역인 서초동 주민센터(13), 사당역(23), 서울고(26) 주변 격자에서의 Impact Level 4단계의 한계강우량은 각각 38.6, 256.3, 244.4 mm로 서초동 주민센터 일대가 침수에 취약한 것으로 나타났으며 실제 서초동 주민센터 일대의 피해가 큰 것으로 나타났다. 또한 서초동 주민센터의 경우 새벽 5시부터 11시까지 4단계의 호우영향레벨 4단계로 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다(Table 2).

재해에 대한 많은 연구를 보면 대부분, 위험도라는 것은 기본적으로 재해, 노출, 취약성의 3가지 조건에 의해 결정된다. 호우영향에 대한 위험도를 분석하여 그 영향을 예보하려면, 호우에 의한 재해(침수심)를 분석하고, 각 지역에서의 인구, 교통, 시설물의 시·공간적인 분포를 고려하여 노출 및 취약성을 산정하여 최종적인 Impact Level을 산정하여야 한다고 판단된다.

현재까지의 연구는 침수심만을 기준으로 호우영향임계값을 산정하여 호우영향레벨을 부여하였다. 때문에 각 레벨별 호우영향한계침수심인 10, 20, 50 cm의 값에 대한 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다. 또한 같은 침수심을 유발하는 곳이라도 그곳에 사람, 차량, 시설물 등의 인프라를 어떻게 고려할 것인지에 대한 연구 또한 꼭 필요한 부분이라고 판단된다.

특히 본 연구 대상지역인 도시중심지가 아닌 산지, 농지, 하천 등 비도시 지역에서는 인구, 교통, 시설물에 대한 분포가 매우 다양하게 나타나고 있기 때문에 이 등 지역의 영향예보를 위해서는 그 지역의 관련 자료의 DB구축 및 분석을 통한 노출 및 취약성을 고려하여 영향예보의 위험도를 산정한다면 보다 정확성 있는 영향예보 기술이 될 것으로 기대한다.

감사의 글

This work was funded by the Korea Meteorological Administration Research and Development Program under Grant KMI [2018-03010].

References

- Cole, S. (2018). Flood forecasting at national scales: Some UK experiences. *National Flood Management Conference 2018*, Dublin, Ireland.
- Cranston, M., Maxey, R., Tavendale, A., Buchanan, P., Motion, A., Cole, S., et al. (2012). Countrywide flood forecasting in Scotland: Challenges for hydrometeorological model uncertainty and prediction. In R.J. Moore, S.J. Cole, and A.J. Illingworth (Eds.), *Weather Radar and Hydrology, Proceedings of Exeter Symposium, April 2011*, IAHS Publ. No. 351, pp. 538-543.
- FFC (Flood Forecasting Centre). (2017). *Flood guidance statement user guide* (Version 4).
- FLO-2D Software, Inc. (2009). *FLO-2D reference manual* (Ver. 2009).
- Huff, F.A. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resour. Res.*, Vol. 3, No. 4, pp. 1007-1019.
- Kim, B.S., Yoon, S.K., Yang, D.M., and Kwon, H.H. (2010). Development of grid-based conceptual hydrologic model. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 7, pp. 667-679.
- Kim, D.J. (2016). Numerical forecasting development direction for impact forecasting support. *Meteorological Technology & Policy*, Vol. 9, No. 1 pp. 32-40.
- Kim, H.M., Min, K.R., Kim, I.G., Lim, B.H., Youn, M.J., and Kim, S.B. (2017). Paradigm shift to impact-based forecasting and warning services for natural hazard response. *Innovation Studies*, Korea Society of Innovation, Vol. 12, No. 3, pp. 161-178.
- KMA (Korea Meteorological Administration). (2012). *A study on the construction of integrated data for meteorological disaster impact forecasting*.
- Korean Meteorological Society. (2016). *Planning study on introduction plan of influence forecast*.
- Lee, B.J. (2017). Analysis on inundation characteristics for flood impact forecasting in Gangnam drainage basin. *Atmosphere*, Korean Meteorological Society, Vol. 27, No. 2, pp. 189-197.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs). (2011). *A study on the improvement of probability rainfall*.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport). (2016). *Development of spatio-temporal flood forecasting technology for watershed for securing golden time*.
- MPSS (Ministry of Public Safety and Security). (2017). *Practice manual for preventing flooding of underground spaces*.
- Price, D., Hudson, K., Boyce, G., Schellekens, J., Moore, R.J., Clark, P., et al. (2012). Operational use of a grid-based model for flood forecasting. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, Vol. 165, No. 2, pp. 65-77.
- Yeh, S.W. (2017). A suggestion for expanding impact prediction services. *Meteorological Technology & Policy*, Vol. 10, No. 1, pp. 6-17.

Received	November 8, 2018
Revised	November 9, 2018
Accepted	November 15, 2018