

Developing a Rainfall Impact Forecasting Model for Disaster Mitigation around the River

Young Seok Song^{1#}, Hyeong Jun Lee², Byung Sik Kim³, Moo Jong Park²⁺

¹ Civil Engineering and Landscape Architectural, Daegu Technical University, 205, Songhyeon-ro, Dalseo-gu, Daegu, Korea

² Department of Civil Engineering, Hanseo University, 46, Hanseo 1-ro, Haemi-Myun, Seosan-si, Chungcheongnam-do, Korea

³ Department of Urban & Environmental Disaster Prevention School of Disaster Prevention, Kangwon National University, 346 Joogang-ro, Smacheok-si, Gangwon-do, Korea

Abstract

Impact forecasting has been applied to estimate flood damage in many different countries based on accurate weather forecasts. This study develops a model forecasting the impact of rainfall on riverside flood risks in the Busan Metropolitan City. The rainfall impact forecasting equations were obtained on a 1km x 1km grid with respect to water levels and critical rainfall thresholds. Critical rainfall was determined based on the end point of river and the discharge-water level relationship between design flood discharge and design flood level by analyzing water-rainfall in 3-hour critical rainfall. Model verification was performed using a heavy rain event with a total of 283.3 mm from July 22 to 24, 2020. According to the rainfall impact forecasting, 60 to 70% of the design flood level ("MEDIUM" alert) was issued on rivers between 10-11pm on July 23. In the rivers where the rainfall impact alert was issued, actual damages were found such as flooded roads and floodplain, which confirmed the appropriateness of the model. The high model accuracy was also validated by comparing the alert standard for water level with forecasted rainfall impact at the water level station in Suyeong River.

Key words: rainfall impact forecasting, disaster reduction, critical rainfall, rainfall impact level, river

1. 서론

우리나라에서 발생하는 자연재해 중 호우와 태풍은 매년 지속적인 피해가 발생하고 있다. 이러한 피해를 저감하기 위해서 매년 재해예방을 위한 국가 R&D 연구와 부처별 시스템 운영에도 불구하고 크고 작은 피해가 지속적으로 발생하고 있다. 2010년 이후의 자

연재해 중 호우와 태풍의 피해는 서울 광화문침수, 우면산 산사태, 울산 태화시장 침수, 부산 해운대구 마린시티 침수 등 대부분 도시지역에서 발생하였다. 이러한 재해에 대응하기 위해 기상청에서는 레이더를 활용하여 호우예보를 운영하고 있으며 부처별 다양한 재해예방 시스템에 연동되어 활용되고 있다. 그러나, 2020년 6월 24일부터 2020년 8월 16일까지 총 54일이

The 1st author: Young Seok Song, Tel. +82-53-560-3876, Fax. +82-53-560-3979, e-mail. kind711@hanmail.net

+ Corresponding author: Moo Jong Park, Tel. +82-41-660-1785, e-mail. mjpark@hanseo.ac.kr

라는 역대 최장 장마기간이 발생하면서 하천, 도시, 산사태 등 사회전반에 걸쳐 인명피해와 재산피해가 발생하였다. 그 중 하천의 경우 제방붕괴와 제방율류에 대한 피해가 발생하면서 하천에 대한 재해예방의 필요성이 대두되었다.

국내의 하천은 1974년 한강의 홍수예경보 시설을 운영한 이래로 낙동강, 금강, 영산강 그리고 섬진강에 국가하천의 재해예방을 위한 홍수통제소가 설치되었다. 국가하천에서 발생하는 홍수 통제, 홍수예경보, 실시간 수위조절 및 예측 등의 관리업무를 담당하고 있다. 강우발생시 각 유역별 유출량과 댐 저류량 등을 고려하여 실시간으로 주요 하천지점에서의 수위와 홍수 규모를 판단하고 계획홍수위의 50%에 해당하는 수위를 홍수주의보, 계획홍수위의 70%에 해당하는 수위를 홍수경보로 홍수예경보를 발령하고 있다. 그러나, 대부분의 하천재해는 대규모의 국가하천보다는 중소규모의 지방하천과 소하천에서 대부분의 피해가 발생되나 모든 하천을 고려한 홍수예경보 체계의 수립은 예산이나 인력부족으로 현실적으로 어려움이 많다. 이러한 중소하천에 대한 피해사례에 대하여 재해예방을 위한 홍수예경보의 구축이나 재해저감 계획 등의 대책이 시급한 실정이다(Shin, *et. al.*, 2004; Ahn, *et. al.*, 2008).

하천재해의 저감을 위한 연구로는 강우-유출에 대한 분포형 모델을 적용하여 하천지역에서 국부적인 강우발생시 홍수량을 예측하거나 매개변수를 조정하여 최적화 모델을 개발하였다(Montaldo, *et. al.*, 2005; Park, *et. al.*, 2008). Brocca, *et. al.*(2011)은 이탈리아의 Tiber River를 대상으로 강우-유출모형인 MIDSc를 이용하여 홍수예측 방안을 제시하였다. 또한, Noh, *et. al.*(2014)은 분포형 모형에다가 레이다 강우를 적용하여 공간해상도의 격자에 따라 매개변수에 미치는 영향을 정확도로 평가하였다. 분포형 모형을 적용한 강우-유출은 하천별 도달시간에 대한 총 유출량의 산정은 가능하나 호우예보를 위한 지속시간별 홍수량과 하천의 영향을 고려하기에는 한계점이 있다.

Choi & Han(2011)은 지방하천인 중랑천을 대상으로

하천지점별 강우량과 유역평균 강우량의 회귀모형을 적용하여 수위를 예측하였다. 또한, 중소하천급의 지방하천을 대상으로 하천별 특성을 고려한 다중회귀모형을 적용하여 계획홍수량을 산정하였다(Jeong & Lee, 2010). Lohani, *et. al.*(2011)은 월 단위 또는 일 단위의 시계열 데이터를 활용하여 하천의 유출량을 예측하였다. Song, *et. al.*(2014)은 중소하천에 대한 홍수예경보 발령기준을 하천 상하류의 수위상승에 대한 시나리오를 적용하여 강우-유출과 유량-수위의 관계를 분석하여 경보발령 강우량을 분석하였다. 하천재해 저감을 위한 다양한 연구에도 불구하고 유출량 산정을 위한 하천의 강우-수위 영향은 다양한 분석이 요구된다. 하천의 재해예방을 위해서는 각각 특성이 다른 하천의 통일성 있는 강우 지속시간의 홍수예경보 기준이 필요하다.

최근 세계기상기구(WMO)에서는 기상현상으로 발생할 수 있는 다양한 분야의 영향을 고려한 영향예보의 필요성을 강조하였으며 영국과 미국을 비롯한 기상 선진국에서는 영향예보를 부분적으로 운영하며 예보서비스에 관한 가이드라인을 구축하였다(WMO, 2015; KMA, 2016). 영국의 홍수예측센터(Flood Forecasting Centre, FFC)는 홍수에 대한 영향예보 매뉴얼을 제안하였으며 홍수위험단계를 4단계로 구분하여 홍수위험매트릭스를 운영하고 있다(FFC, 2017). 또한, 홍수에 대한 영향예보는 분포형 모형인 Grid to Grid(G2G) 모형을 이용하여 격자단위의 영향예보를 실시하고 있다(Cranston, *et. al.*, 2012; Price, *et. al.*, 2012). 또한, 기후변화의 영향으로 재해를 유발하는 기상현상이 증가하고 사회경제에 피해가 증가하여 호우에 대한 영향예보의 적용이 시급하다고 하였다.

국내에서도 최근 영향예보의 도입을 위한 호우 특징과 현황의 사례를 적용한 연구가 진행되었다. 또한, 국토교통부는 홍수에 대한 안전도 강화를 위해 영국의 홍수위험매트릭스 방법을 적용하였다(MOLIT, 2016). Lee(2017)는 강남지역의 홍수피해사례를 중심으로 침수피해를 일으키는 한계강우량을 산정하였다.

호우에 대한 영향예보의 국내 적용에도 불구하고 하천에 대한 영향예보를 위한 기준이나 방법론 개발 등의 연구는 수행되지 않았다.

본 연구에서는 우리나라의 도시, 하천, 해안의 특성을 모두 고려할 수 있는 부산광역시를 대상으로 지방하천의 재해예방을 위한 호우영향예보 모형을 개발하였다. 지방하천을 대상으로 호우영향예보는 기존 연구에서 제안한 격자형식으로 부산광역시를 1km x 1km로 분할하고 지방하천의 통과하는 격자를 대상으로 모형을 적용하였다. 하천의 영향예보를 위한 한계강우량은 우리나라의 기상청에서 호우예보에 활용하고 있는 3시간 예측강우량을 적용하기 위해 하천별 설계빈도에 대한 3시간 지속시간의 강우량을 한계강우량으로 산정하였다. 하천별 한계강우량은 설계홍수량에 대한 홍수위를 4단계로 구분하여 매트릭스 형태의 호우영향예보를 분석하였다. 개발된 호우영향예보 모형은 2020년 7월에 발생한 호우피해사례를 적용하여 시간에 따른 한계강우량과 하천 홍수위의 영향을 비교 분석하였다.

II. 연구방법

1. 하천의 한계강우량 산정 방법

본 연구에서는 중소규모의 지방하천을 대상으로 침수피해가 예상되는 한계강우량과 하천 홍수위의 관계식을 산정하여 하천지역의 재해저감을 위한 호우영향예보 모형을 개발하고자 한다. 중소규모의 지방하천에 대하여 설계빈도, 설계홍수량, 계획홍수위, 하천연장 등의 일반특성을 하천 DB로 구축한다. 하천의 설계홍수량이 가장 큰 하천중점을 한계강우량 산정지점으로 선정하고 하천단면의 설계빈도, 계획홍수위, 최심하상고 등을 조사한다. 하천의 설계빈도에 대한 한계강우량 산정은 지역별 강우관측소의 영향을 반영하기 위하여 티센다각형법을 적용하였다. 지역별 강우관측소의 티센가중치는 행정안전부에서 운영하고 있는 방재성능목표강우량에서 제안한 기준을 동일하게 적용하였

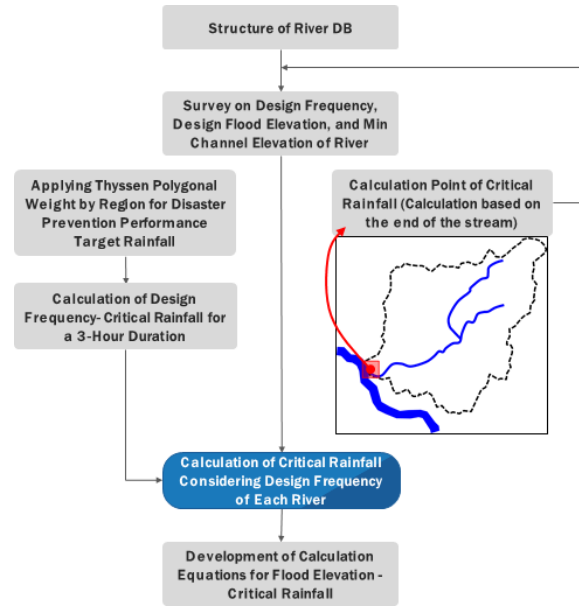
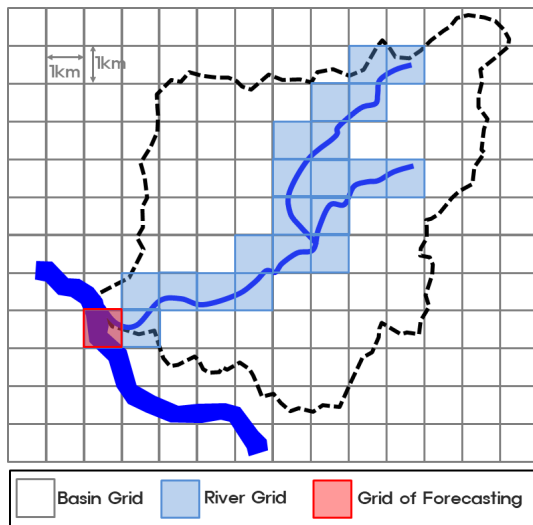


Figure 1. Flow chart of critical rainfall

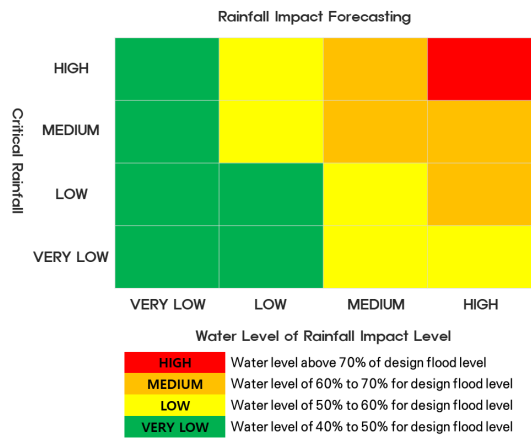
다. 한계강우량은 현재 기상청에서 운영하고 있는 호우예보를 연동하여 운영하기 위해 3시간 지속시간의 한계강우량을 하천별 설계빈도에 대하여 산정한다. 하천중점의 단면을 기준으로 하천 설계빈도의 유량에 따른 계획홍수위의 유량-수위의 관계식을 3시간 지속시간의 한계강우량과 수위-강우량의 관식을 적용하여 한계강우량을 산정한다. 하천중점의 단면을 기준으로 설계빈도를 고려한 3시간 지속시간의 한계강우량에 대하여 계획홍수위에 대한 관계식을 산정한다. 하천별 설계빈도를 고려한 계획홍수위와 한계강우량의 관계식을 산정하는 연구절차는 <Figure 1>과 같다.

2. 하천의 호우영향예보 분석 방법

호우영향예보는 세계기상기구(WMO)에서 필요성을 강조한 이후에 미국과 영국에서 일부 운영하고 있으며 영국의 홍수예측센터(FFC)에서 홍수에 대한 영향예보를 위해 격자단위로 지역을 분배해서 홍수위험 단계를 4단계로 구분하여 운영하고 있다. 호우영향예보는 영향예보에서 호우를 대상으로 정보를 전달하는 예보입니다. 영향예보의 정의는 ‘기상 현상으로 인해 예상되는 사회 경제적 영향을 위험 및 취약성을 고려하여 상세한 기상정보와 함께 전달하는 예보’로 제시



(a) Grid



(b) Forecasting standard

Figure 2. Flow chart of rainfall impact forecasting

하고 있습니다. 본 연구에서는 하천을 대상으로 호우 영향예보를 분석하기 위해 첫 번째 격자단위의 구성, 두 번째 하천의 영향을 받는 격자의 선정, 세 번째 하천의 호우영향예보 발령기준을 4단계로 구분하여 분석방법을 정의하고자 한다. 본 연구에서 하천의 호우 영향예보는 위한 격자의 구성은 하천의 대상유역에 대하여 1km x 1km의 크기로 격자를 구성한다. 유역의 전체 격자 중에 하천이 지나가는 격자를 선택하여 하천의 호우영향예보를 위한 대상격자를 선정한다. 하천의 호우영향예보지점은 하천의 중점을 기준으로 하천 전 구간을 동일한 기준으로 적용한다. 호우영향예보 지점을 하천 지점으로 선정하는 이유는 하천의 침수피해는 대부분 하천의 중점인 유역의 합류지점에서 피해가 발생되기 때문이다. 하천의 호우영향예보 발령기준은 도시지역과 산지지역을 모두 포괄할 수 있도록 4단계로 구분하였다. 호우영향예보 발령기준은 계획홍수위의 40% ~ 50%의 수위를 VERY LOW, 계획홍수위의 50% ~ 60%의 수위를 LOW, 계획홍수위의 60% ~ 70%의 수위를 MEDIUM, 계획홍수위의 70% 이상의 수위를 HIGH로 설정하였다. 하천의 호우영향예보를 위한 유역의 격자구성과 발령기준의 연구절차는 <Figure 2>와 같다.

III. 적용 및 분석

1. 대상지역의 매개변수 구축

본 연구의 대상지역인 부산광역시는 대한민국의 동남단에 위치한 행정구역이다. 부산광역시의 면적은 765.82 km², 인구수는 약 336만명, 행정구역은 15개 구, 1개 군, 2개 읍, 3개 면으로 205개의 행정동으로 구성되어있다. 부산광역시는 도시지역, 산지지역, 해안지역이 복합적으로 위치하고 있는 행정구역으로 국가하천과 지방하천의 포함되어 있으며 호우와 태풍의 피해가 빈번하게 발생하는 지역이다. 부산광역시의 침수피

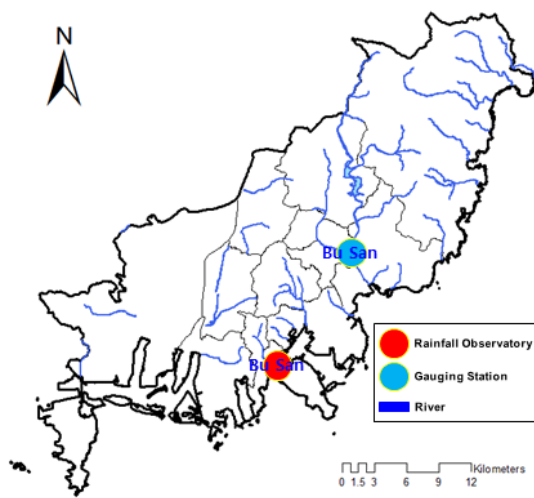


Figure 3. Study area

해는 2016년 태풍 차바로 인하여 해운대구에 위치한 마린시티에 해수가 유입되면서 주변상가 및 도로들의 침수피해가 발생하였으며 2017년에는 호우로 인하여 동래역 인근 하수의 범람으로 도시지역의 침수피해가 발생하였다. 2020년 54일이라는 긴 장마기간과 태풍으로 도시지역, 하천지역, 해안지역에 복합적인 피해가 발생하여 대상지역으로 선정하였다(<Figure 3>).

부산광역시에 기상청에서 운영하는 종관기상관측소와 환경부에서 운영하는 T/M 수위관측소가 위치하고 있다. 부산광역시에 위치하고 있는 부산 강우관측소는 부산시 중구에 위치하고 있으며 1904년부터 강우관측을 관측한 지점이다. 부산광역시의 티센가중

치는 부산 강우관측소의 티센다각형에 모두 포함되어 대표 값으로 사용하였다. 부산광역시에 위치하고 있는 수위관측소는 부산(원동교)지점으로 부산시 해운대구에 위치하고 있으며 2016년부터 수위관측을 관측한 지점이다. 부산(원동교) 수위관측소는 국가하천을 제외하고 지방하천인 수영강에 위치한 유일한 관측지점이다. 부산광역시의 강우 및 수위 관측소 현황은 <Table 1>과 같다.

부산광역시를 통과하는 하천은 국가하천 4개와 지방하천 46개로 총 50개의 하천이 위치하고 있다. 국가하천의 경우 낙동강 홍수통제소에서 홍수예경보를 운영하고 있어서 본 연구의 대상하천에서는 제외하였

Table 1. Status of station

Station	Name	Address	Latitude	Hardness
Rainfall	Busan	Bokbyeongsan-gil 32beon-gil, Jung-gu, Busan, Republic of Korea	35.10	129.03
Water Level	Busan (Wondong Bridge)	Haeun-daero, Haeundae-gu, Busan, Republic of Korea	36.11	129.07

Table 2. Status of rivers in busan metropolitan city

Name	Frequency (yr)	Discharge (m ³ /s)	Water Level(El.m)	Name	Frequency (yr)	Discharge (m ³ /s)	Water Level(El.m)
DaeDeok Cheon	100	364	7.3	Chun Cheon	100	270	0.3
DeokCheon Cheon	100	403	3.5	WooDong Cheon	100	115	0.8
DaeRi Cheon	100	96	3.5	SuYeong River	100	1,710	0.7
SamRak Cheon	80	101	1.2	ImGi Cheon	100	127	71.7
HakJang Cheon	80	345	5.3	SongJeong Cheon	100	110	56.5
GamCheon Cheon	80	110	1.2	CheolMa Cheon	100	432	37.0
ShinEo Cheon	100	240	2.6	IGok Cheon	80	94	78.3
JoMan River	100	2,095	1.3	GuChil Cheon	80	81	77.2
HaeBan Cheon	100	235	2.9	SeokDae Cheon	100	440	6.6
HoGye Cheon	30	34	3.0	OnCheon Cheon	100	594	2.6
GuSan Cheon	30	235	3.4	DongRae Cheon	100	78	9.8
JiSa Cheon	100	355	1.3	Nam Cheon	100	89	2.0
Hyoam Cheon	100	137	14.9	Dong Cheon	100	546	0.5
JangAn Cheon	100	410	1.6	BuJeon Cheon	100	146	2.5
YongSo Cheon	100	117	13.4	GaYa Cheon	100	73	10.1
JwaGwang Cheon	100	610	3.4	JunPo Cheon	100	117	3.2
DeokSeon Cheon	100	128	6.4	HoGye Cheon	100	46	2.1
DongBaek Cheon	100	82	1.0	BuSan Cheon	100	75.8	0.8
IlGwang Cheon	80	350	1.1	ChoRyang Cheon	100	67	0.8
JukSeong Cheon	100	250	0.6	BoSu Cheon	100	216	1.2
ManHwa Cheon	100	154	9.1	GuDeok Cheon	80	38	53.7
SeoBu Cheon	100	82	10.7	GoeJeong Cheon	100	228	0.7
SongJeong Cheon	100	250	0.8	SongJeong Cheon	80	145	1.1

다. 또한, 최근 발생하는 하천재해는 대부분 중소하천 규모의 지방하천에서 발생하고 있어 46개를 대상하천으로 선정하였으며 지방하천의 현황은 <Table 2>와 같다. 부산광역시에 위치한 지방하천의 설계빈도는 30yr ~ 100yr이며 홍수량은 34 m³/s ~ 2,095 m³/s이다. 그러나, 설계빈도가 100yr인 지방하천이 전체의 약 80%인 반면 계획홍수량은 평균 약 280m³/s으로 규모는 크지 않지만 중요도가 높은 지방하천이 대부분 위치하고 있다.

2. 하천의 호우영향예보 모형 분석

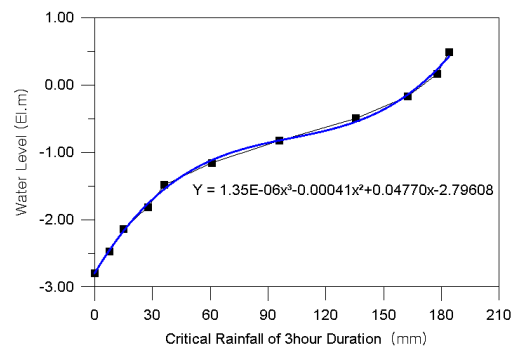
부산광역시를 대상으로 호우영향예보를 위해서 행정구역도를 기준으로 1km x 1km의 격자를 구성하였다. 하천의 경우 부산광역시의 격자에 하천이 통과하는 격자를 선정하였다. 부산광역시의 호우영향예보를 위한 격자는 총 989개로 구축되었으며 그 중 257개의 격자가 46개의 지방하천을 포함하는 격자로 분석되었다(<Figure 4>, (a)).

하천의 호우영향예보를 위해서는 하천의 설계빈도를 고려한 홍수위와 한계강우량에 대한 매개별수별 관계식을 분석한다. 하천은 크기와 중요도에 따라서 설계빈도가 설정되어 각각의 하천별 홍수위와 한계강우량의 산정식을 개발한다. 하천의 호우영향예보는 하천의 종점을 기준으로 설계빈도, 설계홍수량, 설계홍수위, 한계강우량을 산정한다. 한계강우량은 기상청의 호우예보와 동일하게 3시간 지속시간의 한계강우량을 분석한다. 하천별 홍수위와 한계강우량의 산정식을 분석하는데 X축은 3시간 지속시간의 한계강우량을 Y축은 홍수위를 기준으로 3차 방정식을 산정한다. 부산광역시의 46개의 지방하천 중 도시지역에 위치하고 과거 피해가 지속적으로 발생한 동천과 수영강에 대한 산정식은 <Figure 4>, (b)와 <Figure 4>, (c)와 같이 분석되었다.

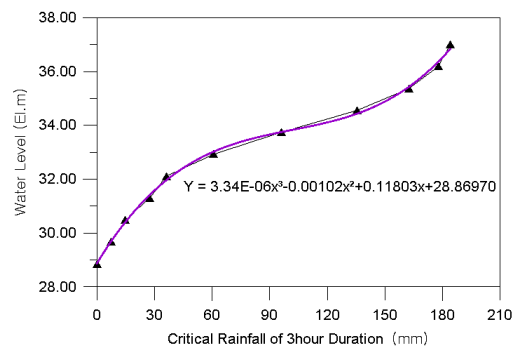
하천별 홍수위와 한계강우량에 대한 매개별수별 관계식을 분석하였다면 호우영향레벨에 따른 홍수위를 4단계로 구분하고 호우영향예보 산정식을 개발한



(a) Grid



(b) Calculation Equation for Critical Rainfall in Dong cheon



(c) Calculation Equation for Critical Rainfall in SuYeong River

Figure 4. Analysis of parameters for rainfall impact forecasting

다. 하천의 호우영향예보는 한계강우량의 4단계, 호우영향레벨 홍수위의 4단계로 총 16단계의 호우영향예보 단계를 분석한다. 홍수위와 한계강우량의 산정식을 접목하여 최종적인 호우영향예보 산정식을 하천별로 산정한다. 호우영향예보의 산정식은 3시간 지속시간의 한계강우량이 x 값이며 호우영향레벨인 홍수위가 y값으로 r²의 결정계수가 가장 높은 3차 방정식을 적용하였다. 부산광역시의 하천별 호우영향예보 산정식은 <Table 3>과 같이 개발되었다. 하천별 호우영향

Table 3. Development of calculation equation for rainfall impact forecasting

Name	Water Level of Rainfall Impact Level(El.m)				Name	Water Level of Rainfall Impact Level(El.m)			
	Very Low	Low	Medium	High		Very Low	Low	Medium	High
DaeDeok Cheon	2.60	3.38	4.16	4.94	Chun Cheon	-0.37	-0.20	-0.03	0.15
Equation	3.19E-06x ³ -0.00098x ² +0.11281x-0.50072				Equation	7.14E-07x ³ -0.00022x ² +0.02523x-1.06793			
DeokCheon Cheon	1.77	2.06	2.34	2.63	WooDong Cheon	-0.73	-0.49	-0.24	0.01
Equation	1.19E-06x ³ -0.00036x ² +0.04190x+0.61345				Equation	1.02E-06x ³ -0.00031x ² +0.03610x-1.72703			
DaeRi Cheon	1.57	1.89	2.21	2.53	SuYeong River	32.12	32.93	33.74	34.56
Equation	1.32E-06x ³ -0.00040x ² +0.04669x+0.28384				Equation	3.34E-06x ³ -0.00102x ² +0.11803x+28.86970			
SamRak Cheon	-0.40	-0.14	0.13	0.40	ImGi Cheon	70.38	70.60	70.82	71.04
Equation	1.21E-06x ³ -0.00036x ² +0.03998x-1.46682				Equation	1.05E-06x ³ -0.00031x ² +0.03358x+69.50262			
HakJang Cheon	1.80	2.38	2.96	3.54	SongJeong Cheon	-0.59	-0.37	-0.14	0.09
Equation	2.63E-06x ³ -0.00078x ² +0.08716x-0.52306				Equation	9.31E-07x ³ -0.00028x ² +0.03291x-1.49729			
GamCheon Cheon	-0.73	-0.41	-0.08	0.24	CheolMa Cheon	32.37	33.14	33.91	34.68
Equation	1.45E-06x ³ -0.00043x ² +0.04807x-2.00617				Equation	3.69E-06x ³ -0.00107x ² +0.11784x+29.28920			
ShinEo Cheon	0.22	0.62	1.02	1.41	IGok Cheon	76.78	77.04	77.30	77.56
Equation	1.62E-06x ³ -0.00050x ² +0.05742x-1.35528				Equation	1.36E-06x ³ -0.00038x ² +0.04069x+75.75308			
JoMan River	-1.72	-1.22	-0.71	-0.21	GuChil Cheon	75.19	75.53	75.86	76.19
Equation	2.05E-06x ³ -0.00063x ² +0.07264x-3.71403				Equation	1.76E-06x ³ -0.00049x ² +0.05251x+73.86397			
HaeBan Cheon	0.06	0.53	0.99	1.46	SeokDae Cheon	3.01	3.62	4.22	4.82
Equation	1.92E-06x ³ -0.00059x ² +0.06800x-1.81441				Equation	2.47E-06x ³ -0.00076x ² +0.08743x+0.60719			
HoGye Cheon	-0.26	0.29	0.84	1.38	OnCheon Cheon	-0.51	0.00	0.51	1.02
Equation	3.95E-06x ³ -0.00100x ² +0.09568x-2.43349				Equation	2.09E-06x ³ -0.00064x ² +0.07395x-2.54392			
GuSan Cheon	0.99	1.39	1.79	2.19	DongRae Cheon	8.29	8.55	8.81	9.07
Equation	2.90E-06x ³ -0.00073x ² +0.07010x-0.60523				Equation	1.06E-06x ³ -0.00032x ² +0.03741x+7.26308			
JiSa Cheon	-1.28	-0.86	-0.43	0.00	Nam Cheon	0.92	1.09	1.26	1.44
Equation	1.76E-06x ³ -0.00054x ² +0.06220x-2.99489				Equation	7.14E-07x ³ -0.00022x ² +0.02523x+0.22207			
Hyoam Cheon	12.75	13.11	13.46	13.82	Dong Cheon	-1.48	-1.16	-0.83	-0.50
Equation	1.71E-06x ³ -0.00050x ² +0.05450x+11.32426				Equation	1.35E-06x ³ -0.00041x ² +0.04770x-2.79608			
JangAn Cheon	-0.26	0.06	0.37	0.68	BuJeon Cheon	0.58	0.90	1.22	1.54
Equation	1.49E-06x ³ -0.00043x ² +0.04747x-1.49629				Equation	1.31E-06x ³ -0.00040x ² +0.04640x-0.69618			
YongSo Cheon	11.11	11.50	11.89	12.28	GaYa Cheon	9.19	9.35	9.50	9.65
Equation	1.86E-06x ³ -0.00054x ² +0.05923x+9.56463				Equation	6.19E-07x ³ -0.00019x ² +0.02189x+8.59180			
JwaGwang Cheon	-0.87	-0.15	0.57	1.28	JunPo Cheon	1.40	1.70	1.99	2.28
Equation	3.43E-06x ³ -0.00099x ² +0.10930x-3.72146				Equation	1.19E-06x ³ -0.00036x ² +0.04219x+0.24347			
DeokSeon Cheon	4.06	4.46	4.85	5.25	HoGye Cheon	1.22	1.37	1.52	1.67
Equation	1.90E-06x ³ -0.00055x ² +0.06060x+2.47473				Equation	6.15E-07x ³ -0.00019x ² +0.02175x+0.62179			
DongBaek Cheon	0.82	1.04	1.25	1.47	BuSan Cheon	-1.63	-1.23	-0.82	-0.42
Equation	1.05E-06x ³ -0.00030x ² +0.03343x-0.05739				Equation	1.66E-06x ³ -0.00051x ² +0.05872x-3.24517			
IlGwang Cheon	0.04	0.21	0.38	0.55	ChoRyang Cheon	-0.76	-0.50	-0.24	0.02
Equation	9.07E-07x ³ -0.00025x ² +0.02712x-0.64795				Equation	1.07E-06x ³ -0.00033x ² +0.03770x-1.79690			
JukSeong Cheon	-1.24	-0.95	-0.66	-0.37	BoSu Cheon	-1.06	-0.69	-0.32	0.05
Equation	1.38E-06x ³ -0.00040x ² +0.04396x-2.38657				Equation	1.52E-06x ³ -0.00046x ² +0.05365x-2.53559			
ManHwa Cheon	7.25	7.56	7.86	8.17	GuDeok Cheon	52.32	52.55	52.77	53.00
Equation	1.48E-06x ³ -0.00043x ² +0.04717x+6.01368				Equation	1.03E-06x ³ -0.00031x ² +0.03429x+51.40273			
SeoBu Cheon	9.01	9.30	9.58	9.86	GoeJeong Cheon	-0.30	-0.13	0.05	0.22
Equation	1.34E-06x ³ -0.00039x ² +0.04289x+7.89335				Equation	7.01E-07x ³ -0.00021x ² +0.02479x-0.97796			
SongJeong Cheon	-0.59	-0.37	-0.14	0.09	SongJeong Cheon	-0.38	-0.13	0.12	0.37
Equation	9.31E-07x ³ -0.00028x ² +0.03291x-1.49729				Equation	1.13E-06x ³ -0.00033x ² +0.03744x-1.37702			

레벨 홍수위를 Very Low, Low, Medium, High로 구분하여 기준을 산정하였으며 산정식에서 x의 값으로 3시간 지속시간의 한계강우량을 적용하여 하천의 수위를 산정하여 호우영향예보를 발령한다. 각 하천별 산정식의 R²의 결정계수는 0.998이 분석되어 개발된 산정식의 적정성을 확보하였다.

IV. 모형의 정확도 검증

1. 호우사상

본 연구에서 개발한 호우영향예보 모형에 대하여 실제 하천재해가 발생한 호우사상을 대상으로 모형의 정확도를 검증하였다. 우리나라는 2020년 54일이라는 기록적인 장마기간이 발생하였으며 다양한 지역에서 호우에 의한 침수피해가 발생하였다. 본 연구의 대상 지역인 부산광역시에서도 호우에 따른 인명피해와 침수피해가 발생하였다(<Figure 5>, (a)). 부산광역시에 장마기간 동안 발생한 12회 이상의 강우사상이 발생하였으며 그 중 가장 큰 피해가 발생한 7월 22일부터 7월 24일의 강우사상을 적용하여 모형의 정확도를 검증하였다(<Figure 5>, (b)). 부산광역시에서 2020년 6월 24일부터 2020년 8월 16일까지의 장마기간동안 발생한 총 강우량은 1,307.8mm이며 일최대 강우량은 7월 10일에 208.7mm, 1시간 최대 강우량은 7월 23일에 70.4mm, 3시간 최대 강우량은 7월 23일 107.8mm가 관측되었다. 본 연구에서 개발한 모형의 정확도를 검증하기 위한 호우사상은 1시간과 3시간의 최대 강우량이 관측된 7월 22일부터 7월 24일까지 호우사상을 선정하였다. 부산광역시에 7월 22일부터 7월 24일까지 발생한 총 강우량은 283.3mm으로 도시지역, 하천지역에서 침수피해가 발생하였으며 기상청의 호우경보가 발령되었다. 부산광역시의 장마기간과 모형검증을 위

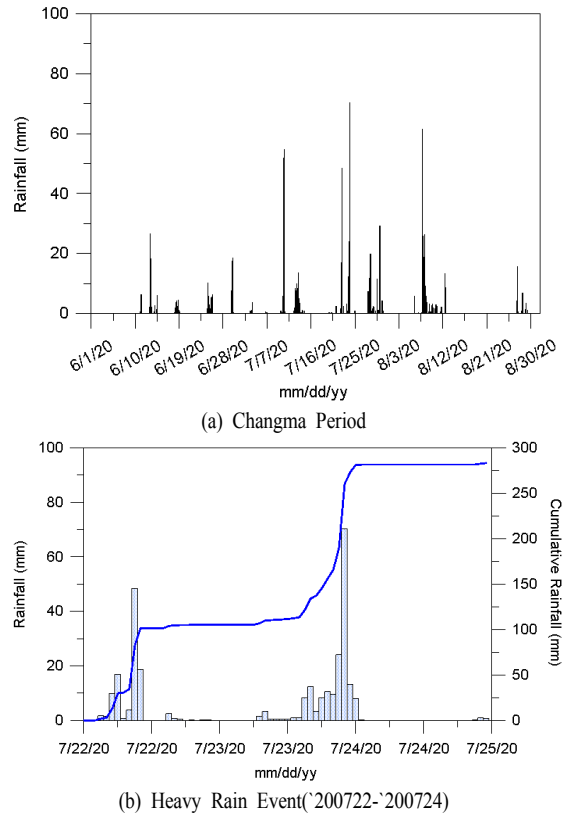


Figure 5. Heavy rain event for model verification

한 호우사상의 강우량 특성은 <Table 4>와 같다.

2. 호우영향예보의 모형 검증

호우영향예보의 모형 검증을 위해 7월 22일부터 7월 24일까지 호우사상을 적용하여 3시간 지속시간의 한계강우량에 대한 하천격자별 호우영향레벨을 분석하였다. 모형 검증을 위한 호우사상 중 가장 피해가 크게 발생하는 7월 23일 21시부터 7월 24일 00시까지의 호우영향예보 분석결과는 <Figure 6>과 같이 분석되었다.

부산광역시의 하천에 대한 호우영향예보는 계획홍수위의 40%의 홍수위가 발생하는 한계강우량이 발생 시 4단계로 구분된 호우영향레벨이 표시된다. 7월 23일 21시에 한계강우량이 40mm 이상 발생하면서 하천

Table 4. Rainfall characteristics of heavy rain events

Duration	Total Rainfall	Maximum daily rainfall	1 hour maximum rainfall	3 hour maximum rainfall
2020.06.24. - 2020.08.16.	1,307.8 mm	208.7 mm	70.4 mm	107.8 mm
2020.07.22. - 2020.07.24.	283.3 mm	168.2 mm	70.4 mm	107.8 mm

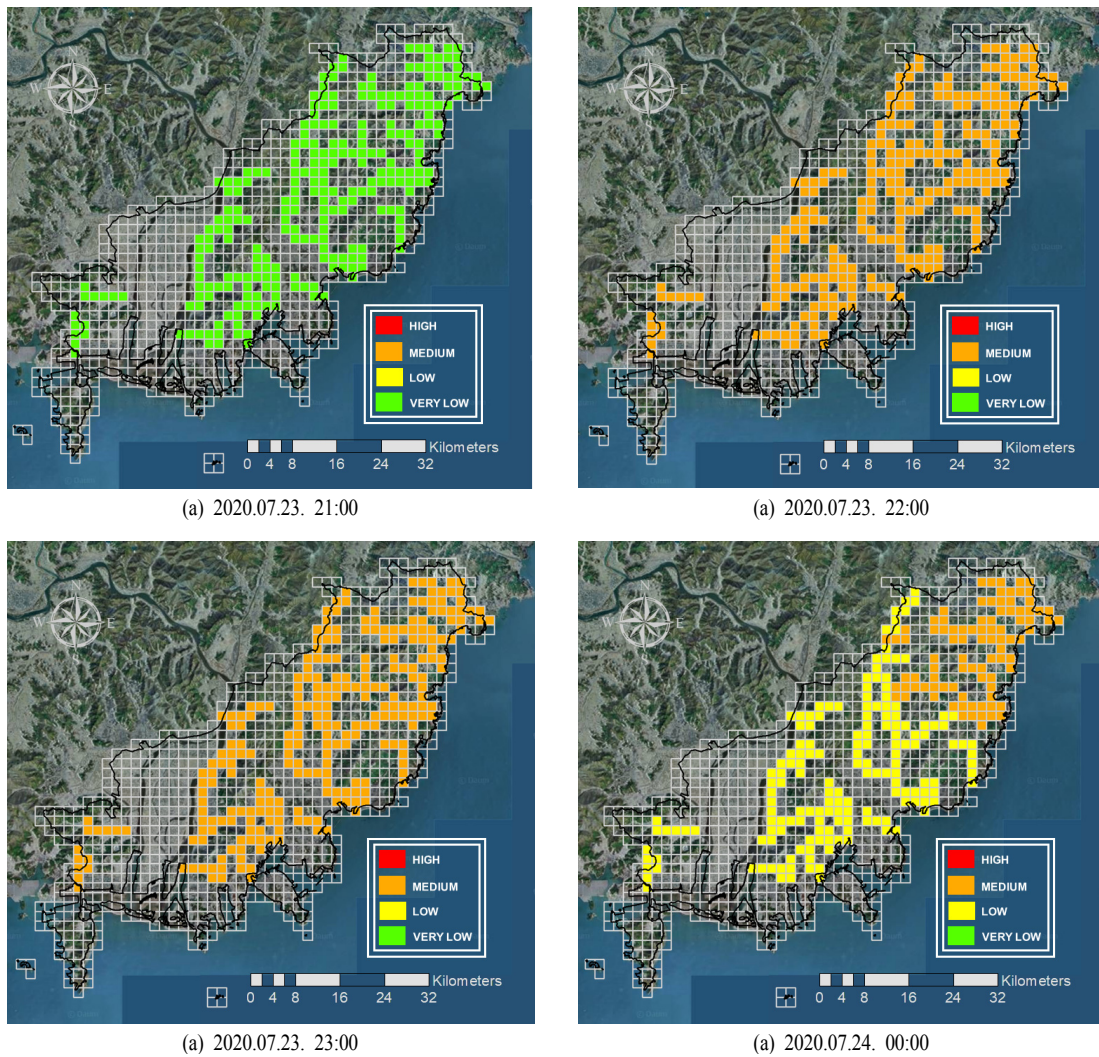


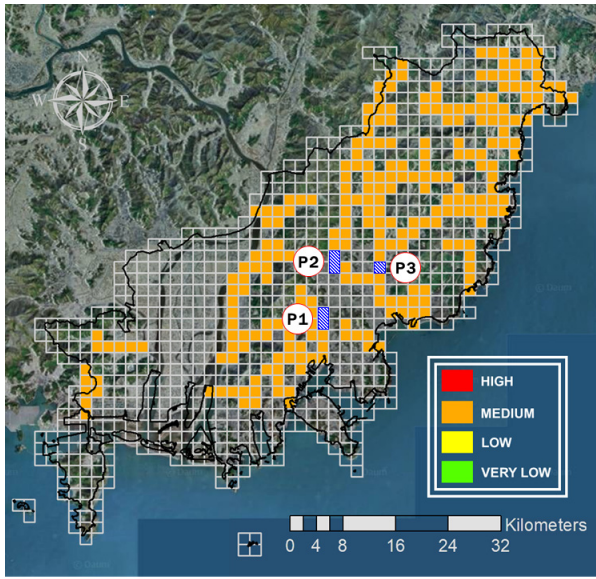
Figure 6. Analysis result of rainfall impact forecasting

의 VERY LOW의 호우영향예보가 발령되었었다. 7월 23일 22시에 1시간 최대 강우량이 70.4mm가 발생하면서 22시와 23시에 계획홍수위의 40%의 홍수위에 해당하는 MEDIUM의 호우영향예보가 발령된다. 7월 24일 00시에 강우량이 감소하면서 하천의 설계빈도에 따라 호우영향예보가 LOW와 MEDIUM으로 구분되어 하천의 위험정도에 따라 발령되었다.

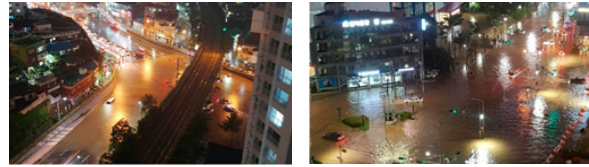
부산광역시의 호우영향예보 모형의 검증을 위한 호우사상은 실제 부산광역시 지역에서 일부 하천지역에서 피해가 발생하였다. 호우영향예보

모형에서 가장 피해가 높은 분석된 7월 24일 22시와 23시에 분석결과를 기반으로 실제 침수피해가 발

생한 피해지역을 <Figure 7>, (a)과 같이 표시하였다. 부산광역시에서 기사와 시민제보를 통해 조사된 피해 하천은 동천, 온천천, 수영강으로 총 3곳에서 피해를 검증할 수 있는 자료를 수집하였다. 동천은 MEDIUM의 호우영향예보가 발령되었으며 하천월류와 동천의 배수위 상승에 따른 우수관거 월류가 발생한 지역으로 도로와 인근 상가지역에서 피해가 발생하였다 (<Figure 7>, (b)). 온천천은 MEDIUM의 호우영향예보가 발령되었으며 온천천의 홍수위가 고수부지는 보다는 높고 계획홍수위보다는 낮은 수위가 관측되어 호우영향예보 모형의 분석에 적정성을 확인할 수 있었다(<Figure 7>, (c)).



(a) Flood Damage Areas



(b) P1(Dong Cheon)



(c) P2(OnCheon Cheon)



(d) P3(SuYeong River)

Figure 7. Review of adequacy for river damage

수영강은 MEDIUM의 호우영향예보가 발령되었으며 고수부지를 초과하는 홍수위가 발생하였으나 하천 윗류에 대한 피해는 발생하지 않았다(<Figure 7>, (d)).

수영강은 부산광역시의 지방하천 중 유일하게 수위관측소가 운영되고 있는 하천으로서 호우사상기간에 수영강의 홍수위 영향을 본 연구에서 분석한 호우영향예보 결과와 비교하였다. 수위관측소의 7월 22일부터 24일까지의 관측자료를 검토한 결과 MEDIUM의 호우영향예보가 발령된 23일 22시부터 24일 00시까지 계획홍수위의 60% ~ 70%의 범위에 해당하는 수위가 관측되었다(<Figure 8>). 따라서, 본 연구에서 개발된 하천의 호우영향예보 모형의 적정성은 피해사례

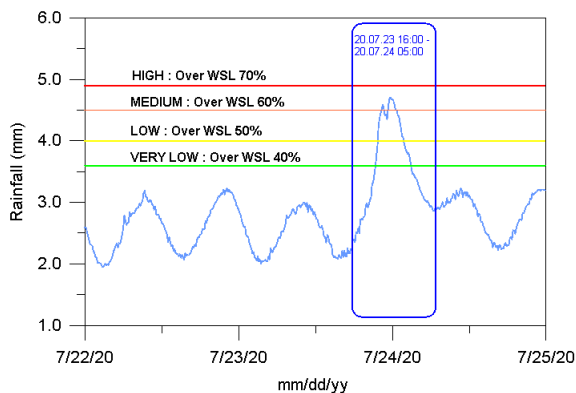


Figure 8. Status of water level for suyeong river by heavy rain event

와 관측자료를 통해 검증되었다.

V. 결론

본 연구에서는 최근 미국과 영국 등 기상 선국에서 운영되고 있는 영향예보를 하천을 대상으로 호우영향예보의 모형을 개발하였다. 대상지역은 다년간 도시지역, 하천지역, 해안지역에서 피해가 복합적으로 발생하고 있는 부산광역시를 대상으로 선정하였다. 부산광역시는 국가하천 4개, 지방하천 46개가 통과하는 지역으로 홍수통제소에서 관리하는 국가하천을 제외한 46개의 하천을 대상으로 호우영향예보의 모형을 개발하였다. 하천의 호우영향예보 모형 개발은 부산광역시를 1km x 1km의 격자로 분석하여 총 989개의 격자로 구성하였으며 그 중 257개의 격자가 하천에 격자로 선정하였다. 각 하천의 종점을 기준으로 계획홍수위에 따른 3시간 지속시간의 한계강우량을 산정하였으며 호우영향레벨에 따른 호우영향예보 산정식을 개발하였다.

본 연구에서 개발된 하천의 호우영향예보 모형은 2020년 7월 22일부터 24일까지 발생한 호우사상을 적용하여 모형의 정확도를 검증하였다. 모형의 검증을

위한 호우사상에서 23일 21시부터 24일 00시까지 가장 높은 호우영향레벨이 분석되었다. 호우영향예보에서는 시간에 따라 VERY LOW, LOW, MEDIUM이 예보되었으며 실제 피해사례와 검증하였다. 실제 피해사례는 46개의 하천 중 동천, 온천천, 수영강이 조사되었으며 동천은 하천월류와 우수관거 배수위 영향에 따른 침수피해가, 온천과 수영강은 고수부지이상의 홍수위가 관측되었다. 수영강의 수위관측소의 관측자료와 호우영향예보의 호우영향레벨을 비교한 결과 수영강의 관측 수위가 계획홍수위의 60% ~ 70%의 수위인 MEDIUM이 예보될 때 관측수위도 MEDIUM이 관측되었다. 실제 피해사례와 수영강 관측수위를 검토한 결과 본 연구에서 개발한 하천의 호우영향예보 모형의 정확도 및 활용도가 높은 것으로 검증되었다.

향후 연구로는 현재 부산광역시의 총 격자는 989개 중 약 26%인 257개의 하천지역에 대해서만 호우영향예보의 모형이 개발되어 추가적으로 도시지역이나 산지지역에 대한 연구를 수행된다면 다양한 호우피해에 대한 영향예보가 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 선진기술개발연구사업(KMI2018-03010)의 지원으로 수행되었음.

References

- Ahn, Jae Chan, Jong Seol Lee, Woo Chung Choi, and Byong Ju Lee. 2008. A Study on Warning Criteria Investigation of Automated Rainfall Warning System: Focused on Relationship of Water Level, Discharge and Precipitation. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 8(4): 101-110.
- Brocca, L., F. Melone, and T. Moramarco. 2011. Distributed Rainfall-runoff Modelling for Flood Frequency Estimation and Flood Forecasting. *Hydrological Processes*. 25(18): 2801-2813.
- Choi, Seung Yong and Kun Yeun Han. 2011. Comparison and Analysis for Performance of Flood Stage Prediction Regression Model According to Type of Input Rainfall. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*. 11(5): 313-325.
- Cranston, M., R. Maxey, A. Tavendale, P. Buchanan, A. Motion, S. Cole, A. Robdon, J. Moore, and A. Minnett. 2012. Countrywide Flood Forecasting in Scotland: Challenges for Hydrometeorological Model Uncertainty and Prediction. *Weather Radar and Hydrology*. 351(April): 538-543.
- FFC. 2017. *Flood Guidance Statement User Guide*. 4th ed. Flood Forecasting Centre.
- Jeong, Dong Kug and Beum Hee Lee. 2010. Development of Urban Flood Water Level Forecasting Model Using Regression Method. *Journal of Korea Water Resources Association*. 43(2): 221-231.
- KMA. 2016. *Meteorological Technology & Policy 9*. 1th ed. Korea Meteorological Administration.
- Lee, Byong Ju. 2017. Analysis on Inundation Characteristics for Flood Impact Forecasting in Gangnam Drainage Basin. *Journal of Korean Meteorological Society*. 27(2): 189-197.
- Lohani, A. K., N. K. Goel, and K. K. S. Bhatia. 2010. Comparative Study of Neural Network, Fuzzy Logic and Linear Transfer Function Techniques in Daily Rainfall-runoff Modeling Under Different Input Domains. *Hydrological Processes*. 25(2): 175-193.
- MOLIT. 2016. *Development of Spatio-temporal Flood Forecasting Technology for Watershed for Securing Golden Time*. 1th ed. Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Montaldo, N., R. Rondena, J. D. Albertson, and M. Mancini. 2005. Parsimonious Modeling of Vegetation Dynamics for Ecohydrologic Studies of Water-limited Ecosystems. *Water Resources Research*. 41(10): 1-16.
- Noh, Seong Jin, Shin Woo Choi, Yun Seok Choi, and Kyung Tak Kim. 2014. Impact Assessment of Spatial Resolution of Radar Rainfall and a Distributed Hydrologic Model on Parameter Estimation. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*. 34(5): 1443-1454.
- Park, Jin Hyeog, Boo Sik Kang, and Geun Sang Lee. 2008. Application Analysis of GIS Based Distributed Model Using Radar Rainfall. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*. 16(1): 23-32.

Price, D., K. Hudson, G. Boyce, J. Schellekens, R. J. Moore, P. Clark, T. Harrison, E. Connolly, and C. Pilling. 2012. Operational Use of a Grid-based Model for Flood Forecasting. *Water Management*. 165(2): 65-77.

Shin, Hyun Suk, Hong Tae Kim, and Moo Jong Park. 2004. An Application of Making the Flash Flood Warning Trigger Rainfall in Real Basin Using GIS and GCUH: At the Namcheon Basin of the Sobaek Mountain. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*. 24(4B): 311-319.

Song, Yang Ho, Young Seok Song, Moo Jong Park, and Jung Ho Lee. 2014. Flood Forecasting Estimation Methodology of Standard Rainfall for Urban Mid and Small Rivers Considering Upper- and Down-stream Water Levels. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*. 14(2): 289-298.

WMO. 2015. *WMO Guidelines on Multi-hazard Impact-based Forecast and Warning Services*. WMO-No. 1150. World Meteorological Organization.

Korean References Translated from the English

노성진, 최신우, 최윤석, 김경탁. 2014. 레이더 강우 및 분포형 수문모형의 공간해상도가 매개변수 추정에 미치는 영향

평가. *대한토목학회논문집*. 34(5): 1443-1454.

박진혁, 강부직, 이근상. 2008. 레이더강우를 이용한 GIS기반의 분포형모형 적용성 분석. *대한공간정보학회논문집*. 16(1): 23-32.

송양호, 송영석, 박무중, 이정호. 2014. 상·하류 관측수위 기반 도시 중소하천 홍수예경보 기준 강우량 산정기법. *한국방재학회논문집*. 14(2): 289-298.

신현석, 김홍태, 박무중. 2004. GIS 및 GCUH를 이용한 돌발홍수 경보발령기준우량 산정의 실유역 적용 연구: 소백산 남천 유역 중심. *대한토목학회논문집*. 24(4B): 311-319.

안재찬, 이종철, 최우정, 이병주. 2008. 자동우량경보시설 경보 발령기준 검토 연구: 수위, 유출량, 강수량의 관계를 중심으로. *한국방재학회논문집*. 8(4): 101-110.

이병주. 2017. 강남지역 홍수영향예보를 위한 침수특성 분석. *한국기상학회논문집*. 27(2): 189-197.

정동국, 이범희. 2010. 회귀기법을 이용한 도시홍수위 예측모형의 개발. *한국수자원학회논문집*. 43(2): 221-231.

최승용, 한건연. 2011. 입력 강우 형태에 따른 수위예측 회귀모형의 성능 비교분석. *한국방재학회논문집*. 11(5): 313-325.

Received: Nov. 10, 2020 / Revised: Nov. 25, 2020 / Accepted: Nov. 25, 2020

하천지역의 재해저감을 위한 호우영향예보 모형 개발

국문초록 최근 다양한 국가에서 영향예보를 위한 연구가 수행되고 있다. 이러한 영향예보는 정확한 기상예보를 기반으로 다양한 분야의 침수피해를 예방하기 위해 활용이 가능하다. 본 연구에서는 부산광역시를 대상으로 하천의 호우영향예보 모형을 개발하였다. 호우영향예보 모형은 1km x 1km의 격자를 대상으로 하천의 홍수위와 한계강우량에 대하여 산정식을 개발하였다. 한계강우량은 하천의 종점을 기준으로 설계홍수량과 설계홍수위에 대한 유량-수위 관계를 3시간 지속시간의 한계강우량에 수위-강우에 대하여 산정식을 분석하였다. 모형의 검증은 2020년 7월 22일부터 24일까지 총 283.3mm가 발생한 호우사상을 분석하였다. 분석결과 하천의 호우영향예보는 7월 23일 22시부터 23시까지 호우영향레벨이 계획홍수량의 60%~70%(MEDIUM)이 발령되었다. 호우영향예보가 발령된 하천에서는 도로침수, 고수부지 침수 등의 피해자료와 일치하여 모형의 적정성을 확인하였다. 또한, 수영강 수위 관측소의 홍수위와 호우영향예보의 발령기준이 동일한 것으로 검토되어 모형의 정확도가 높은 것으로 검증되었다.

주제어 : 호우영향예보, 재해저감, 한계강우량, 호우영향레벨, 하천지역

Profiles **Young Seok Song** : He received his B.A., M.A., Ph.D. from Hanseo University, Korea in 2017. He is a Professor of Civil Engineering and Landscape Architectural at Daegu Technical University, in which he has taught since 2019. His interesting subject and area of hydrology, disaster damage and disaster management. He has published 34 articles in journals and written 1 book(kind711@hanmail.net).

Hyeong Jun Lee : He received his mater of engineering from Hanseo University, Korea in 2014. He is a Ph.D course of the Department of of Construction Engineering at Hanseo University. His interesting subject of research is hydrology and disaster management(heesup25@daum.net).

Byung Sik Kim : He received his B.A., M.A., Ph.D. from Inha University, Korea in 2005. He is a Professor of the Department of Urban & Environmental Disaster Prevention Engineering at Kangwon National University, in which he has taught since 2011. His interesting subject and area of stochastic hydrology and climate change. He has published about 150 articles in journals and written 3 books(hydrokbs@kangwon.ac.kr).

Moo Jong Park : He received his B.A., M.A., Ph.D. from Korea University, Korea in 1995. He is a Professor of the Department of Civil Engineering at Hanseo University, in which he has taught since 1999. His interesting subject and area of hydrology, disaster damage and disaster management. He has published 160 articles in journals and written 5 book(mjpark@hanseo.ac.kr).