



Development and application of urban flood alert criteria considering damage records and runoff characteristics

Cho, Jeawoong^a · Bae, Changyeon^a · Kang, Hoseon^{a*}

^aNational Disaster Management Research Institute

Paper number: 17-080

Received: 25 September 2017; Revised: 8 November 2017; Accepted: 8 November 2017

Abstract

Recently, localized heavy rainfall has led to increasing flood damage in urban areas such as Gangnam, Seoul (‘12), Busan (‘13), Ulsan (‘16) Incheon and Busan (‘17) etc. Urban flooding occurs relatively rapidly compared to flood damage in river basin, and property damage including damage to houses, cars and shopping centers is more serious than facility damage to structures such as levees and small bridges. In Korea, heavy rain warnings are currently announced using the criteria set by KMA (Korea Meteorological Administration). However, these criteria do not reflect regional characteristics and are not suitable to urban flood. So in this study, estimated the flooding limit rainfall amount based on the damage records for Seoul and Ulsan. And for regions that can not estimate the flooding limit rainfall since there is no damage records, we estimated the flooding limit rainfall using a Neuro-Fuzzy model with runoff characteristics. Based on the estimated flooding limit rainfall, the urban flood warning criteria was set. and applied to the actual flood event. As a result of comparing the estimated flooding limit rainfall with the actual flooding limit rainfall, the error of 1.8~20.4% occurred. And evacuation time was analyzed from a minimum of 28 minutes to a maximum of 70 minutes. Therefore, it can be used as a warning criteria in the urban flood.

Keywords: Urban flooding, Warning criteria, Limit rainfall, Neuro-Fuzzy model

피해이력 및 유역특성을 고려한 도시침수 위험기준 설정 및 적용

조재웅^a · 배창연^a · 강호선^{a*}

^a국립재난안전연구원

요 지

최근 집중호우로 서울 강남구(‘12), 부산(‘13), 울산(‘16), 인천, 부산(‘17) 등 대도시 지역의 침수 피해가 증가하고 있다. 도시침수는 하천유역의 홍수 피해와는 달리 매우 짧은 시간에 피해가 발생하며, 시설물의 파괴보다는 주택, 차량, 상가 침수로 인한 재산 피해가 높은 비율을 차지하고 있다. 현재 우리나라의 호우에 대한 예·경보는 기상청에서 발표하는 호우 주의보 및 경보에 의존하고 있지만, 기상청의 호우 주의보 및 경보는 전국 공통 지표를 사용함으로써 지역적 특성을 반영하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 서울과 울산지역을 대상으로 지역별로 피해이력 기반의 한계강우량을 추정하였으며, 피해이력이 없어 한계강우량 추정이 불가능한 지역에 대해서는 유역특성이 반영된 Neuro-Fuzzy 모형을 통해 한계강우량을 예측하였다. 추정된 한계강우량을 통해 도시침수 위험기준을 설정하고 실제 침수사상에 적용한 결과 추정된 한계강우량은 실제 한계강우량과 1.8~20.4%의 오차를 보이고 있으며, 최소 28분에서 최대 70분의 대피시간을 확보 할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 도시침수 예·경보를 위한 위험기준으로 활용가능 할 것으로 판단된다.

핵심용어: 도시침수, 경보 기준, 한계강우량, Neuro-Fuzzy 모형

*Corresponding Author. Tel: +82-52-928-8175
E-mail: hydro8487@korea.kr (H. Kang)

1. 서론

국제 재난기록 자료서버인 CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters)의 EM-DAT에 의하면 2016년 전세계적으로 자연재해(301건) 중 약 50%가 홍수피해인 것으로 조사되었으며, 우리나라의 경우 지난 21세기에 들어 호우현상이 증가하는 지역적 특성을 보이고 있다. 특히 한국 기후변화 평가 보고서(2014)에서는 연평균강수량이 1971~2000년 1,315 mm에서 2001~2010년 1,412 mm으로 7.4% 증가하였으며, 호우일수는 1971~2000년 20일에서 2001~2010년 28일로 8일이 증가하였다. 이와 함께 2001년 서울 신림동, 2001년 강남고속버스터미널, 2002년 경남 김해시, 2003년 경남 마산시에 침수피해가 발생하였으며, 특히 2009년 이후에는 2009년 부산시, 2010년 9월 21일 추석기간의 서울 및 인천지역의 집중호우 피해, 2011년 강남역, 사당역 등 침수 및 우면산 산사태로 인한 인명피해발생, 2012년 강남역 일대 침수, 2014년 부산 집중호우 피해, 2016년 태풍 “차바(Chaba)” 내습시 울산지역 침수피해, 2017년 장마기간에 인천 침수피해 및 집중호우로 인한 부산 침수 등 대도시권에서 침수로 인한 피해가 지속적으로 발생하고 있다. 이와 같은 대도시권에 집중호우로 인한 침수피해는 하천홍수와는 달리 매우 짧은 시간에 발생하여 대응할 시간이 부족하며, 주택 및 상가, 차량, 인구가 집중되어 있어 피해가 크게 발생한다. 따라서, 집중호우 피해를 줄이기 위해서는 정확한 예측과 함께 침수 위험기준이 필요하다.

우리나라와 지형, 도시 특성 등이 가장 유사한 일본의 호우 주의보 및 경보 기준은 과거 침수피해를 바탕으로 주의보·경보 기준 강우량을 설정하며, 유역우량지수, 토양우량지수, 지정하천예경보 등을 활용하여 시군구 단위의 호우 및 홍수경보 기준을 설정하고 있다. 특히 태풍, 집중호우에 의해 수십 년에 한번 해당하는 호우 발생이 예상될 때에는 대우특별경보를 발표하고 있다. 영국에서도 하천, 조수, 해안, 표면류, 지표침수 등의 매트릭스를 통해 위험기준을 4단계로 분류하여 예보를 하고 있으며 강과 해수면의 높이를 15분 주기로 업데이트 하여 웹사이트에서 확인이 가능한 시스템이 구축되어 있다.

우리나라는 기상청에서 제공하는 전국 동일한 6시간, 12시간 기준에 의한 호우 주의보·경보만을 사용하고 있다. 홍수 예·경보는 하천중심으로 이루어지고 있기 때문에 강우량보다는 하천의 수위에 따라 위험경보를 발령하고 있으며, 홍수 통제소에서 하천수위에 따른 홍수 예·경보를 실시하고 있으나 중소하천 또는 도시하천에 대해서는 연구가 미비한 상황이다. Song *et al.* (2014)은 상·하류 관측수위 기반의 도시 중소하

천 홍수 예·경보 기준 강우량 산정기법에 대해 연구하였고, Song and Lee (2016), Jun *et al.* (2013)의 도시지역의 홍수 예·경보를 위한 연구들이 있지만 모두 하천 수위 영향에 의한 침수에 대해서 연구가 이루어져 왔다.

그러나 최근 발생하는 도시 침수 피해는 하천의 범람으로 인한 외수영향보다는 집중호우시 배수 불량으로 인한 내수 침수가 많이 발생하고 있어 기존의 호우 주의보·경보 기준과 하천수위 중심의 예·경보 체계는 짧은 시간에 발생하는 도시 침수 대응에는 한계가 있으며, 일본과 같이 과거 피해이력과 도시지역의 유출특성을 반영한 새로운 도시침수 위험기준의 마련이 필요한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 과거피해이력 및 유역특성기반의 한계강우량 예측 모델을 통해 한계강우량을 추정하고 경보기준을 설정하고자 한다.

2. 한계강우량 산정

도시침수 한계강우량은 도시지역에서 침수피해가 발생할 수 있는 강우량을 의미하며, 도로의 연석높이 약 25 cm 정도를 기준으로 한다. 또한 경보기준을 만드는데 있어 매우 중요한 자료이다. 한계강우량을 산정하는 방법은 과거 피해이력 분석을 통해 산정하는 방법, 도시침수 수치모델링을 통해 산정하는 방법, 비교적 간단한 유출모형을 통해 산정하는 방법, 우수관망의 설계강우량을 이용하는 방법 등 다양하다. 본 연구에서는 도시침수 한계강우량을 산정하기 위하여 과거 피해이력 분석을 통해 산정하는 방법과 과거 피해이력이 존재하지 않는 지역에 대한 한계강우량 예측을 위한 도시지역 유출특성에 따른 한계강우량 추정방법을 개발하였다.

강우자료는 기상청의 ASOS (Automated Surface Observing System) 및 AWS (Automatic Weather System) 1분단위 관측 자료를 활용하였으며, 피해자료는 NDMS (National Disaster Management System)에 등록된 침수피해 자료를 활용하였다. 도심지의 유출은 대부분 우수관망을 통해 이루어지고, 짧은 시간에 공간적 환경이 변화하는 특성을 반영하여 최근 10년간의 자료를 활용하였다. 대상지역은 최근 서울에서 침수 피해가 발생한 강남구, 강서구, 관악구, 서초구, 양천구의 99개 읍면동과 2016년 태풍 “차바”로 인해 피해가 난 울산시 4개 구 44개 읍면동을 선정하였다.

2.1 피해이력기반의 한계강우량 산정

피해이력 분석을 통해 한계강우량을 산정하기 위해서는 피해당시의 강우관측자료와 침수심관측자료가 필요하다. 그러

나 실제 침수 당시의 정확한 계측자료가 없기 때문에 본 연구에서는 NDMS에 등록된 피해를 기준으로 피해발생 당시의 지속시간별 강우량과 피해가 발생하지 않은 강우이벤트의 지속시간별 강우량을 분석하여 결정한다. 본 연구에서 과거 피해이력을 통해 한계강우량을 산정하는 방법은 Fig. 1과 같다.

NDMS 사유시설 피해이력 중 재해의 대상은 도시침수의 주된 피해를 가져오는 내수침수에 대해 집중하여 분석하였고 ASOS, AWS 1분단위 강우자료의 30분, 60분, 180분, 360분 임의시간별 최대강우량을 산정하여 강우이벤트와 피해, 미피해 이력을 통해 한계강우량을 추정하였다. 여기서 강우자료상 지속시간 6시간 이상의 강우가 없을 경우 별도의 강우이벤트로 정의 하였다. 피해이력기반으로 한계강우량 산정이 가능한 지역과 불가능한 지역에 대한 예시는 Fig. 2와 같다. Case 1은 피해가 발생하지 않은 이벤트의 강우량이 피해가 발생한 이벤트의 강우량보다 크기 때문에 피해이력으로 한계강우량을 산정할 수 없는 경우이며, Case 2는 피해가 발생한 이벤트의 강우량이 더 크지만 피해가 발생하지 않은 강우량과의 차이가 20%를 초과하여 결과의 신뢰성을 갖기 어려운 경우이다. 마지막으로 Case 3은 본 연구에서 산정하고자 하는 한계

강우량을 비교적 정확히 산정할 수 있는 경우이다.

피해이력과 강우량을 분석한 결과 서울지역은 총 99개 중 25개 읍면동, 울산지역은 44개 중 2개 읍면동에 대해 한계강우량 산정이 가능하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다.

피해이력기반의 한계강우량 추정 결과를 살펴보면 60분 한계강우량은 최소 45.2 mm에서 최대 94.6 mm로 나타났으며, 평균 71.4 mm인 것으로 분석되었다. 이는 약 9년 빈도에 해당하는 강우로 실제 현재 우수관망 시선 설계기준과 유사하다. 공향동, 등촌1동, 등촌2동, 목3동, 발산1동, 우장안동, 방화2동, 화곡3동, 목2동, 목4동이 동일한 결과로 분석된 것은 강서구와 양천구의 경계지역으로 지형적으로 저지대이며, 최종적으로 하나의 우수배수관로를 이용하는 지역이기 때문에 동일한 강우이벤트에 대해 피해가 발생하였다. 또한 실제 침수발생 시간을 정확히 확인할 수 없어 피해발생 당시의 지속시간별 최대강우량 값을 사용하였기 때문에 동일한 결과로 분석되었다.

2.2 유역특성기반의 한계강우량 추정

피해이력 분석 방법은 과거 피해이력이 있는 지역에 대해

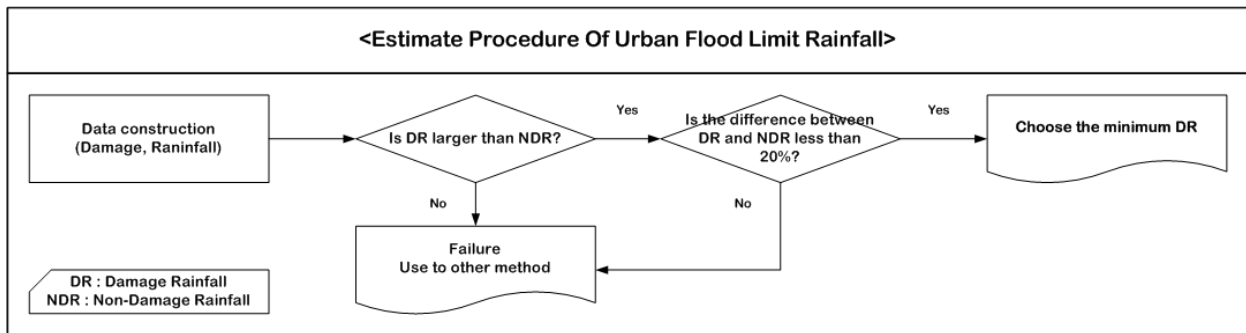


Fig. 1. Estimate procedure of urban flood limit rainfall

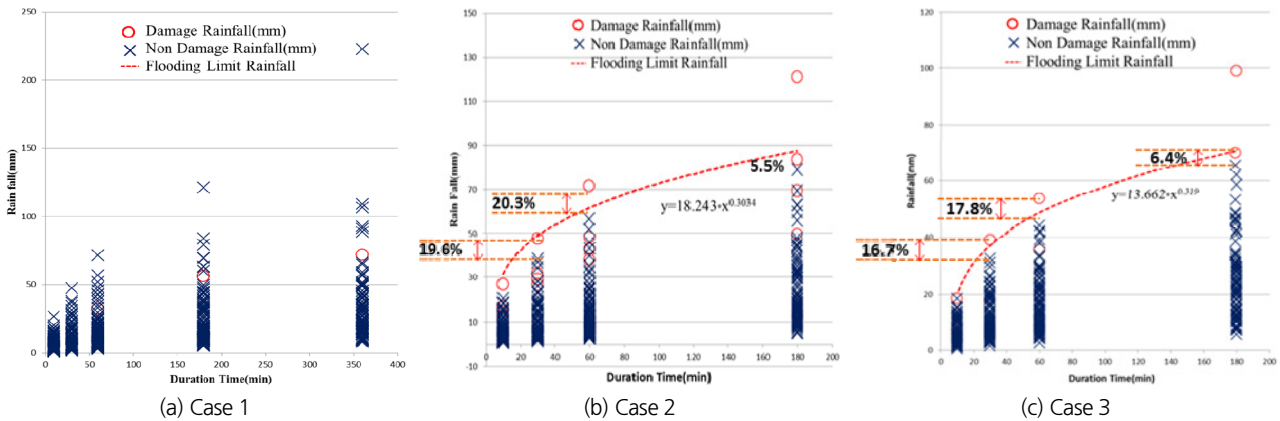


Fig. 2. Example of urban flood limit rainfall estimate based on damage records

Table 1. Result of urban flooding limit rainfall by damage records

City	District	Rainfall duration (mm)			
		30	60	180	360
Seoul	Sillim-dong	50.3 mm	71.8 mm	126.1 mm	179.9 mm
	Haengun-dong	60.0 mm	94.6 mm	194.9 mm	307.5 mm
	Gonghang-dong	50.8 mm	82.0 mm	175.4 mm	283.3 mm
	Deungchon-1dong	50.8 mm	82.0 mm	175.4 mm	283.3 mm
	Deungchon-2dong	50.8 mm	82.0 mm	175.4 mm	283.3 mm
	Mok-3dong	50.8 mm	82.0 mm	175.4 mm	283.3 mm
	Balsan-1dong	50.8 mm	82.0 mm	175.4 mm	283.3 mm
	Ujangsan-dong	50.8 mm	82.0 mm	175.4 mm	283.3 mm
	Banghwa-2dong	50.8 mm	82.0 mm	175.4 mm	283.3 mm
	Hwagok-3dong	50.8 mm	82.0 mm	175.4 mm	283.3 mm
	Mok-2dong	50.8 mm	82.0 mm	175.4 mm	283.3 mm
	Mok-4dong	50.8 mm	82.0 mm	175.4 mm	283.3 mm
	Samseong-2dong	44.2 mm	74.9 mm	172.4 mm	291.9 mm
	Daechi-2dong	42.4 mm	67.1 mm	138.9 mm	219.8 mm
	Namhyeon-dong	48.5 mm	69.3 mm	121.9 mm	174.2 mm
	Nonhyeon-1dong	39.2 mm	57.4 mm	104.8 mm	153.3 mm
	Nonhyeon-2dong	42.4 mm	67.2 mm	139.1 mm	220.1 mm
	Daechi-4dong	43.8 mm	71.2 mm	153.9 mm	250.4 mm
	Segok-dong	36.7 mm	52.7 mm	93.4 mm	134.2 mm
	Suseo-dong	42.4 mm	67.1 mm	138.9 mm	219.8 mm
Gaepo-4dong	39.2 mm	57.4 mm	104.8 mm	153.3 mm	
Banpo-1dong	47.5 mm	76.3 mm	161.9 mm	260.2 mm	
Banpo-4dong	47.2 mm	74.4 mm	152.9 mm	240.9 mm	
Yangje-2dong	39.2 mm	59.0 mm	112.6 mm	169.3 mm	
Naegok-dong	30.4 mm	45.2 mm	84.8 mm	126.0 mm	
Ulsan	Jungang-dong	38.2 mm	54.9 mm	97.7 mm	140.6 mm
	Taehwa-dong	35.1 mm	48.5 mm	80.9 mm	111.6 mm
	Maximum	60.0 mm	94.6 mm	194.9 mm	307.5 mm
	Minimum	30.4 mm	45.2 mm	80.9 mm	111.6 mm
	Average	45.7 mm	71.4 mm	145.7 mm	229.1 mm
	Frequency (year)	8	9	17	49

서는 비교적 정확한 한계강우량 산정이 가능하지만, 피해이력이 없거나 한계강우량 산정을 위한 조건을 만족하지 않는 지역에 대해서는 한계강우량 산정이 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 도시지역의 유출특성에 따른 유역특성기반 한계강우량 추정방법을 개발하였다. 한계강우량과 침수에 영향을 미치는 유출특성인자들 간에는 비선형성을 고려하여야 한다. 회귀모형, 인공신경망, 퍼지 등 다양한 자료기반 모형 중 비선형성이 강한 경우 예측 신뢰도가 높은 Neuro-Fuzzy 모형을 한계강우량 추정에 적용하였다.

2.2.1 매개변수 선정

한계강우량 예측모형의 매개변수를 선정하기 위해 피해이력기반으로 한계강우량 추정이 가능한 지역을 대상으로 추정된 한계강우량과 유역특성간의 민감도 분석 및 상관분석을 하였다. 그 결과 유출특성 매개변수로 불투수율과 경사를 선정하였다. 관거밀도는 행정동에 위치한 총 관거길이를 면적에 대한 비율로 산정하였으며, 빗물펌프장의 경우 몽리면적을 고려하여 빗물펌프장이 포함된 행정동에 한하여 수방능력을 고려하였다. 인자들의 민감도 분석결과는 Fig. 3과 같다.

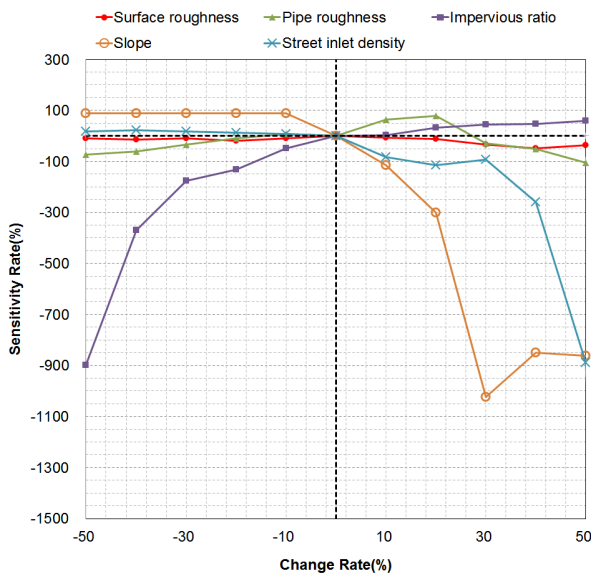


Fig. 3. Sensitivity analysis

2.2.2 Neuro-Fuzzy 모형 구축 및 적용

Neuro-Fuzzy 모형은 신경망과 퍼지 이론을 결합한 모형으로 기본이론은 Jang (1993)에 의해 최초 제안되었으며, 그 이후 Brown and Harris (1994), Lin and Lee (1996), Kim and Kasabov (1999)에 의해 오늘날까지 연구 발전되고 있다. Neuro-Fuzzy 모형은 인간의 추론능력을 근사한 퍼지이론과 학습 및 적응능력이 있는 신경망이 결합된 모형으로 복잡성과

불확실성을 나타내는 비선형 시스템에서 효과적인 모형이다. 유역특성기반의 한계강우량 예측모형 개발을 위해 구축된 Neuro-Fuzzy 모형의 구조도를 Fig. 4에 나타내었다.

Neuro-Fuzzy 모형의 훈련자료는 피해이력기반 한계강우량 산정이 가능한 서울 25개, 울산 2개 행정동에 대한 유역특성자료를 활용하였으며, 매개변수별 유역특성자료의 범위를 Table 2에 나타내었다. 모형 적용대상의 유역특성이 훈련자료의 범위를 벗어날 경우 모형의 결과값을 찾을 수 없는 문제점이 발생한다.

한계강우량을 산정하기 위해 가장 적합한 멤버십함수의 유형과 개수를 찾기 위해서 삼각형 소속함수(trimf), 사다리꼴 소속함수(trapmf), Bell-shaped 소속함수(gbellmf), Gaussian 소속함수(gaussmf, gauss2mf), Sigmoid 소속함수(dsigmf, psigmf)를 적용하였고 멤버십함수의 수는 3, 4, 5를 적용하여 오차를 비교·분석하였다. 오차 분석결과는 Table 3과 같다.

멤버십함수 유형과 소속함수에 개수에 따라서 최대 2.5562, 최소 0.00003, 평균 0.44603의 오차범위를 가지는 것으로 나타났으며, Gaussian, Gaussian2, Pi 멤버십 함수에서 오차가 작은 것으로 나타났다. 본 연구에서는 일반적으로 자료간의 비선형성이 강한 경우 정확성이 높다고 알려져 있으며, 오차가 가장 작은 Gaussian2 소속함수(gauss2mf), 함수의 개수는 5개를 적용한 Neuro-Fuzzy 모형을 이용하여 한계강우량 예측모형을 개발하였다.

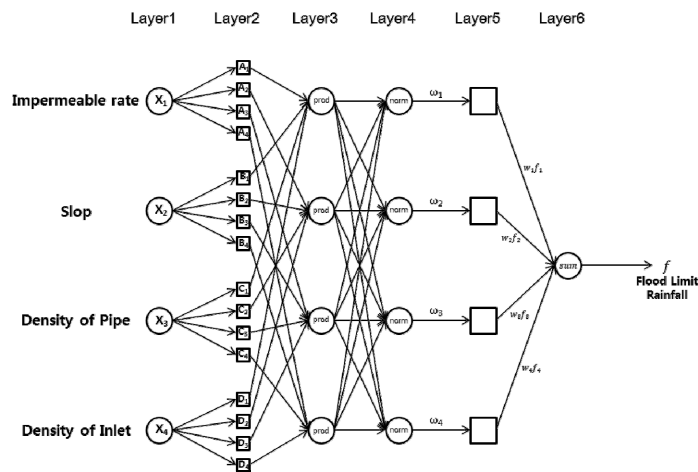


Fig. 4. Structure of Neuro-Fuzzy model

Table 2. Input data for training

Parameter	Density of pipe	Impermeable rate	Slope	Density of inlet	Ability of drainage pump station
Minimum	0.001	16.15	0.80	0.00007	0
Maximum	0.046	100.00	39.85	0.00226	86

Table 3. Error by membership function type and number of function

MF		Error	
Type	Function	Linear	Constant
trimf	3	1.43310	2.55620
	4	0.00059	1.29080
	5	0.00007	-
trapmf	3	1.55570	2.46300
	4	0.46323	2.51810
	5	-	-
gbellmf	3	0.00022	0.09986
	4	0.00030	0.01225
	5	0.00052	0.00026
gaussmf	3	0.00049	0.04545
	4	0.00007	0.00571
	5	0.00004	0.00041
gauss2mf	3	0.00007	1.15130
	4	0.00008	0.09999
	5	0.00003	0.00044
pimf	3	0.00007	1.74580
	4	0.00008	1.47290
	5	0.00005	0.00165
dsigmf	3	0.00012	1.20510
	4	0.00026	0.37029
	5	0.00008	0.00038
psigmf	3	0.00013	1.20510
	4	0.00026	0.37029
	5	0.00006	0.00038

Neuro-Fuzzy 모형의 검증은 모형을 만들기 위한 훈련자료가 될 그룹과 보정 및 검증을 위한 그룹을 구분하여 검증을 하여야 하지만 본 연구에서는 훈련자료가 27개에 불과하여 25개를 훈련자료로 사용하여 모형을 개발하고, 2개를 검증자료로 사용하는 방법으로 27개의 시나리오를 구성하였다. 그러나 유역특성은 다르지만 한계강우량이 동일한 훈련데이터의 경우 모형의 신뢰성을 저하시킬 수 있어 공항동, 등촌1,2동,

Table 4. Scenario for verification of model

Scenario no.	Training data no.	Verification data no.
1	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17	1, 2
2	1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17	2, 3
3	1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17	3, 4
...
16	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15	16, 17
17	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16	17, 1

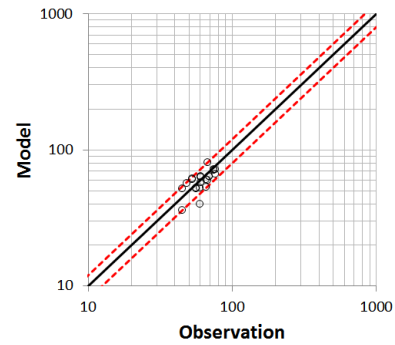


Fig. 5. Comparison of observation and model (RMSE)

목2, 3, 4동, 발산1동, 우장산동, 방화2동, 화곡3동 10개 행정동은 훈련자료에서 제외하였다. 따라서 최종적으로 Table 4와 같이 17개의 시나리오에 대해 모형의 적용성을 확인하였다.

Fig. 5는 피해이력기반으로 작성된 한계강우량 추정값과 모형을 통해 예측된 값을 비교한 것으로, 분석결과 RMSE (Root Mean Square)가 9.3 mm 인 것으로 나타났다. RMSE는 평균제곱근편차로 모델이 예측한 값과 실제 환경에서 관찰되는 값의 차이를 표현하는 척도로 한계강우량 예측결과에서 평균적으로 9.3 mm의 오차가 발생할 수 있음을 의미한다.

울산지역 4개구 44개 행정동의 유역특성을 분석한 결과 남구달동, 신정3동, 5동 등 총 11개 행정동의 유역특성이 모형의 적용 범위를 벗어나는 것으로 나타나 모형 적용 대상에서 제외하였으며, 33개 행정동을 대상으로 모형에 적용하여 한계강우량을 예측하였다. 적용 가능한 대상지역의 유역특성 범위는 Table 5와 같다.

유역특성기반의 한계강우량 예측 결과를 Table 6에 나타내었다. 한계강우량 예측 결과를 살펴보면 60분 한계강우량은 최소 41.7 mm에서 최대 89.1 mm로 나타났으며, 평균 58.7 mm인 것으로 분석되었다. 이는 약 10년 빈도에 해당하는 강우로 우수관망 지선 설계기준과 동일하게 나타났다. 또한 180분과 360분 지속시간에 대한 한계강우량 역시 9년 빈도에 해당하는 강우로 모형의 결과를 충분히 활용 가능할 것으로 판단된다. 하지만 유역특성기반의 한계강우량 예측결과는 모

Table 5. Input data for training

Parameter	Density of pipe	Impermeable rate	Slope	Density of inlet	Ability of drainage pump station
Minimum	0.001	16.15	1.28	0.00012	0
Maximum	0.012	95.21	22.73	0.00180	80

Table 6. Result of urban flooding limit rainfall by model

District		Rainfall duration (mm)			
		30	60	180	360
Nam-gu	Daehyeon-dong	41.5 mm	56.7 mm	93.1 mm	127.3 mm
	Mugeo-dong	45.1 mm	60.1 mm	94.5 mm	125.9 mm
	Samsan-dong	48.2 mm	66.3 mm	109.8 mm	151.1 mm
	Samho-dong	50.8 mm	79.8 mm	163.2 mm	256.2 mm
	Seonam-dong	45.1 mm	60.1 mm	94.6 mm	125.9 mm
	Suam-dong	34.4 mm	47.0 mm	77.0 mm	105.1 mm
	Sinjeong-1dong	44.9 mm	59.8 mm	94.3 mm	125.6 mm
	Sinjeong-2dong	45.0 mm	59.8 mm	93.9 mm	124.7 mm
	Sinjeong-4dong	45.1 mm	60.0 mm	94.3 mm	125.5 mm
	Yaemjangsaengpo	45.1 mm	60.1 mm	94.5 mm	125.8 mm
Dong-gu	Ok-dong	45.1 mm	60.1 mm	94.7 mm	126.2 mm
	Nammok-1dong	32.3 mm	47.8 mm	88.9 mm	131.6 mm
	Nammok-2dong	46.8 mm	62.1 mm	97.5 mm	129.5 mm
	Daesong-dong	42.2 mm	58.8 mm	99.4 mm	138.5 mm
	Bangeo-dong	41.7 mm	62.6 mm	119.1 mm	178.6 mm
	ilsan-dong	42.1 mm	58.5 mm	98.5 mm	136.9 mm
	Jeonha-2dong	62.3 mm	89.1 mm	157.2 mm	224.9 mm
Buk-gu	Hwajeong-dong	22.3 mm	41.7 mm	112.2 mm	209.7 mm
	Nongso-1dong	34.4 mm	50.3 mm	91.5 mm	133.4 mm
	Yeompo-dong	39.7 mm	56.9 mm	100.4 mm	143.6 mm
Jung-gu	Hyomun-dong	52.0 mm	65.9 mm	96.0 mm	121.7 mm
	Daun-dong	44.7 mm	63.3 mm	109.8 mm	155.5 mm
	Bangu-1dong	36.1 mm	48.3 mm	76.8 mm	102.8 mm
	Bangu-2dong	49.2 mm	70.7 mm	125.7 mm	180.6 mm
	Byeongyeong-1dong	38.6 mm	62.1 mm	131.7 mm	211.6 mm
	Byeongyeong-2dong	33.4 mm	47.6 mm	83.6 mm	119.3 mm
	Boksan-1dong	40.1 mm	54.0 mm	86.8 mm	117.1 mm
	Seongan-dong	43.9 mm	65.5 mm	123.5 mm	184.1 mm
	Yaksa-dong	42.8 mm	58.9 mm	97.5 mm	134.1 mm
	Ujeong-dong	35.0 mm	48.4 mm	80.8 mm	111.6 mm
	Jungang-dong	38.3 mm	55.1 mm	98.1 mm	141.1 mm
	Taehwa-dong	35.0 mm	48.4 mm	80.8 mm	111.6 mm
Hakseong-dong	38.0 mm	49.9 mm	76.5 mm	100.3 mm	
Maximum		62.3 mm	89.1 mm	163.2 mm	256.2 mm
Minimum		22.3 mm	41.7 mm	76.5 mm	100.3 mm
Average		41.9 mm	58.7 mm	101.1 mm	143.6 mm
Frequency (year)		15	10	9	9

형에 의한 예측값으로 실제 위험기준에 적용하기 위해서는 지속적인 모니터링 및 실제 침수사상을 통한 충분한 평가와 검증이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한 적용범위의 확대를 위해 충분한 훈련자료의 확보와 다양한 유역특성 반영을 통해 개선되어야 할 것으로 판단된다.

3. 도시침수 위험기준 설정 및 적용

3.1 위험기준 설정

위험기준은 침수가 발생하기 전 침수발생 위험을 알리는 것으로, 적정대응·대피 시간을 고려하여야 한다. 위험기준이 낮을 경우 잦은 위험알림으로 인하여 신뢰성이 저하될 수 있으며, 높을 경우 충분한 대응과 대피시간을 확보하지 못할 수

있다. 따라서 위험기준의 설정은 매우 중요하다고 할 수 있다. 앞서 분석한 한계강우량은 지속시간 30분, 60분, 180분, 360분에 대해 분석하였으나, 지속시간 30분의 경우 대응과 대피시간을 확보하기 매우 곤란하며, 이를 확보하기 위해서는 매우 낮은 기준으로 인하여 잦은 위험 알림이 발생할 수 있으므로 위험기준 설정에서는 제외하였다. 또한 대부분의 도시침수가 지속시간 3시간 이내의 강우에서 주로 발생하기 때문에 지속시간 360분도 위험기준 설정에서 제외하였다. Fig. 6은 위험단계별 대피시간 확보를 위한 경계단계별 한계강우량 비율을 추정한 결과이다. 이때 한계강우량 추세선은 한계강우량 추정·예측이 가능한 울산지역의 지속시간에 따른 한계강우량에 대한 회귀곡선을 이용하여 추정하였으며, 추세선의 결정계수(R^2)는 0.86이다.

주의단계에서는 지속시간 60분에 한계강우량의 50%, 지속시간 180분에서는 한계강우량의 60%로 설정하였으며, 경계단계는 지속시간 60분에 60%, 180분에 70%, 위험단계의 경우 60분에 70%, 180분에 80%로 설정하였다. 그 결과 주의단계에서는 지속시간 60분일 경우 평균 약 37분, 180분 약 91분의 대피시간을 확보 할 수 있는 것으로 나타났으며, 경계단계에서는 지속시간 60분에 30분, 180분에 70분, 위험단계는 60분에 23분, 180분에 48분의 대피시간을 확보 할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 단계별로 제시된 위험기준의 한계강우량 비율은 적절한 것으로 판단된다.

울산지역에 행정동별로 설정된 위험기준은 Table 7과 같다.

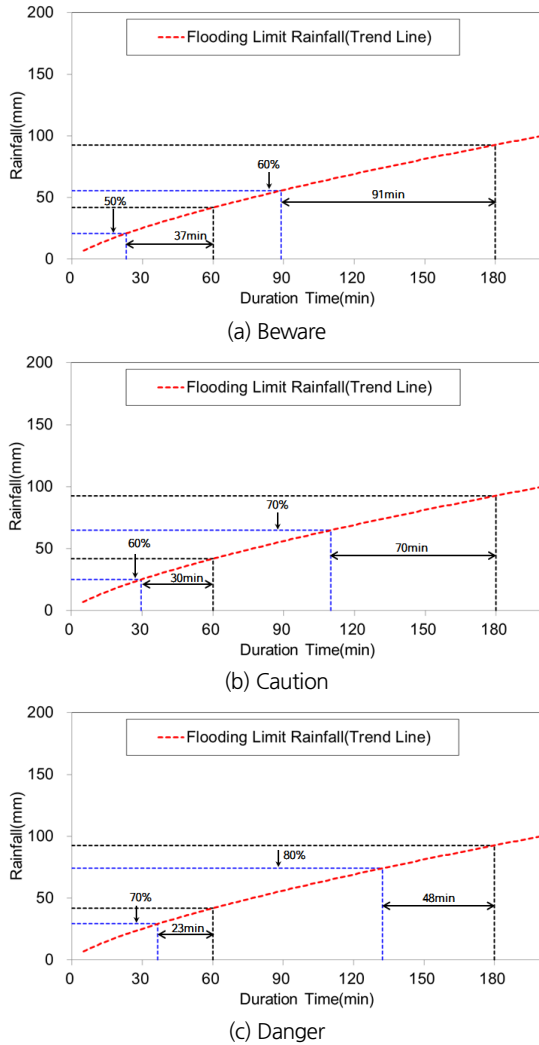


Fig. 6. Flooding limit rainfall ratio by warning level

Table 7. The criteria of flooding warning by model

District		Warning criteria	Rainfall duration (min)	
			60	180
Nam-gu	Dal-dong	Beware	30.1 mm	56.8 mm
		Caution	36.1 mm	66.2 mm
		Danger	42.1 mm	75.7 mm
Dong-gu	Nammok-1dong	Beware	23.9 mm	53.4 mm
		Caution	28.7 mm	62.3 mm
		Danger	33.5 mm	71.2 mm
Buk-gu	Gangdong-dong	Beware	23.6 mm	53.2 mm
		Caution	28.4 mm	62.1 mm
		Danger	33.1 mm	70.9 mm
Jung-gu	Taehwa-dong	Beware	24.2 mm	48.5 mm
		Caution	29.1 mm	56.6 mm
		Danger	33.9 mm	64.7 mm
	Jungang-dong	Beware	27.6 mm	58.9 mm
		Caution	33.1 mm	68.7 mm
		Danger	38.6 mm	78.5 mm

3.2 도시침수 경보기준 적용

위에서 제시된 경보기준을 검증하기 위해 2016년 10월 5일 태풍 “차바” 내습시 침수피해가 발생했던 태화동과 중앙동을 대상으로 한계강우량과 경보발령시간을 검토하였다. 당시 CCTV를 통해 태화동과 중앙동의 침수시간을 확인한 결과 최초침수는 태화시장 내부에서 10시23분에 시작되었으며, 중앙동 우정시장 내부에서도 동일하게 10시23분에 발생하였다. 지속시간 30분, 60분, 180분에 대한 한계강우량은 각각 41.8 mm, 60.9 mm, 96.0 mm로 나타났으며, 이는 피해이력기반으로 산정된 한계강우량과 큰 차이는 발생하지 않아 설정된 한계강우량 값은 적절하다고 판단된다. 비교결과는 Table 8과 같다.

다음은 경보단계별 한계강우량 비율의 적절성 검토하였다. 태풍 “차바” 사례의 경우 태화동과 중앙동모두 지속시간 60분의 위험기준에 의해 최초경보가 발생하였다. 태화동의 경우 침수발생 70분전 주의, 57분전 경계, 47분전 위험 알람이 발생하였으며, 중앙동의 경우 61분전 주의, 48분전 경계, 28분전 위험 알람이 발생한 것으로 나타나 대피시간은 충분히 확보되는 것으로 나타났다. 태화동과 중앙동의 경보단계 별 대피시간은 Table 9와 같다.

Table 8. Comparison of actual limit rainfall and estimated limit rainfall

District	Rainfall duration (min)	
	60	180
'16.10.5. 10:23 Flooding limit rainfall	60.9 mm	96.0 mm
Taehwa-dong	48.5 mm	80.9 mm
Jungang-dong	54.9 mm	97.7 mm

Table 9. Result of warning criteria application

Time	Taehwa-dong		Jungang-dong	
	Warning criteria	Evacuation time	Warning criteria	Evacuation time
9:13	Beware	70 min		
9:22			Beware	61 min
9:26	Caution	57 min		
9:35			Caution	48 min
9:36	Danger	47 min		
9:55			Danger	28 min
10:23	Flooding			

4. 결 론

본 연구에서는 도시침수 예·경보를 위한 침수 위험기준을 설정하기 위하여 과거피해이력을 기반으로 도시지역의 침수 위험 한계강우량을 추정하였으며, 과거침수피해이력이 없는 지역에 대한 위험기준을 설정하기 위해 유역특성기반의 한계강우량 추정모형을 개발하였다. 또한 추정된 한계강우량과 침수위험기준을 실제 침수사상과 비교하여 적용성을 검토하였다.

피해이력기반의 침수 위험기준을 설정하기 위해 최근 10년간 NDMS에 등록된 과거침수피해자료와 ASOS, AWS 1분 단위 강우관측 자료를 활용하여 피해이력기반의 한계강우량 추정결과 서울지역 4개구(강남구, 서초구, 관악구, 양천구, 강서구) 총 99개 행정동 중 25개 행정동, 울산지역은 4개구(남구, 동구, 북구, 중구) 44개 행정동 중 2개 행정동에 대한 한계강우량 추정이 가능하였다.

과거피해이력이 없는 지역에 대한 한계강우량 추정을 위해 유역특성기반의 한계강우량 산정모형을 개발하였다. 민감도 및 상관분석, 배수체계의 수방능력을 고려하여 불투수율과 경사, 관거밀도, 빗물펌프장의 수방능력, 빗물받이 밀도를 모형 매개변수로 선정하였으며, Neuro-Fuzzy 모형을 이용하여 유역특성기반의 한계강우량 예측모형을 개발하였다. 모형 검증결과 RMSE가 9.3으로 나타났다. 울산지역에 적용 가능한 33개 행정동을 대상으로 한계강우량을 예측하였다.

도시침수 위험기준은 충분한 대피시간을 확보할 수 있도록 한계강우량 비율을 설정하였으며, 행정동별로 지속시간에 따른 위험기준 단계별 강우량을 설정하였다. 설정된 위험기준(안)의 적용성을 검토하기 위하여 2016년 10월 5일 태풍 “차바” 내습시 강우사상에 대하여 적용한 결과 실제 침수발생 한계강우량과 추정된 한계강우량의 차이는 약 1.8~20.4%인 것으로 나타났으며, 태화동의 경우 위험 47분 전, 중앙동의 경우 28분 전에 위험 알람이 발생하는 것으로 나타나 충분한 대피시간은 확보하는 것으로 분석되었다.

피해이력기반의 한계강우량 추정 결과는 비교적 정확한 한계강우량 추정이 가능하지만 피해자료가 충분하지 않기 때문에 지속적인 모니터링과 자료보완 및 최신화를 통해 개선이 필요할 것으로 판단된다. 또한 유역특성기반의 한계강우량 예측모형은 실제 침수사상을 통한 충분한 평가와 검증이 필요할 것으로 판단되며, 적용범위 확대를 위한 다양한 유역특성이 반영된 훈련자료 확보 및 유역특성에 따른 군집화 등의 연구를 통해 개선된다면, 도시침수 예·경보를 위한 위험기준으로 활용하여 도시침수로 인한 피해 저감에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 국립재난안전연구원의 지원(주요 2017-01-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Brown, M., and Harris, C. (1994). *Neuro-Fuzzy adaptive modelling and control*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J.
- Cred Crunch 45 (2016). 2016 preliminary data: Human impact of natural dsasters. *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED)*.
- Japan Meteorological Agency. www.jma.go.jp.
- Jun, H. D., Lee, J. H., and Park, M. J. (2013). "Flood forecasting methodology for mid and small rivers using a coupling of upper-and down stream water level stations." *Magazine of Kosham*, Vol. 12, No. 4, pp. 49-57.
- Kim, J., and Kasabov, N. (1999). "HYFIS: adaptive neuro-fuzzy inference systems and their application to nonlinear dynamical systems." *Neural Networks*, Vol. 12, No. 9, pp. 1301-1319.
- Korea Meteorological Agency. www.kma.go.kr.
- Lin, C. T., and Lee, C. S. G. (1996). *Neural fuzzy systems: a neuro-fuzzy synergism to intellingent systems*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J.
- Ministry of Environment and National Institute of Environmental Research, Korean Climate Change Assessment Report (2014).
- National Disaster Management Research Institute (2015). *Establishment of foundation for regional urban flood response system*.
- Song, Y. H., and Lee, J. H. (2016). "Analysis of flood prediction and warning alert standard for urban mid and small stream." *Proceedings of the Korea Contents Association Conference*, Vol. 2016, No. 5, pp. 463-464.
- Song, Y. H., Song, Y. S., Park, M. J., and Lee, J. H. (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*, Vol. 14, No. 2, pp. 289-298.