



Research on flood risk forecast method using weather ensemble prediction system in urban region

Choi, Youngje^a · Yi, Jaeung^{b*}

^aPh.D Candidate, Department of Civil System Engineering, Ajou University, Suwon, Korea

^bProfessor, Department of Civil System Engineering, Ajou University, Suwon, Korea

Paper number: 19-073

Received: 30 August 2019; Revised: 10 October 2019; Accepted: 10 October 2019

Abstract

Localized heavy storm is one of the major causes of flood damage in urban regions. According to the recent disaster statistics in South Korea, the frequency of urban flood is increasing more frequently, and the scale is also increasing. However, localized heavy storm is difficult to predict, making it difficult for local government officials to deal with floods. This study aims to construct a Flood risk matrix (FRM) using ensemble weather prediction data and to assess its applicability as a means of reducing damage by securing time for such urban flood response. The FRM is a two-dimensional matrix of potential impacts (X-axis) representing flood risk and likelihood (Y-axis) representing the occurrence probability of dangerous weather events. To this end, a regional FRM was constructed using historical flood damage records and probability precipitation data for basic municipality in Busan and Daegu. Applicability of the regional FRMs was assessed by applying the LENS data of the Korea Meteorological Administration on past heavy rain events. As a result, it was analyzed that the flood risk could be predicted up to 3 days ago, and it would be helpful to reduce the damage by securing the flood response time in practice.

Keywords: Urban flood, Flood risk, Flood risk matrix, Ensemble weather prediction

양상불 기상예측 자료를 활용한 도시지역의 홍수위험도 예측 방안에 관한 연구

최영제^a · 이재응^{b*}

^a아주대학교 건설시스템공학과 박사과정, ^b아주대학교 건설시스템공학과 교수

요 지

여름철 집중호우는 도시지역의 홍수피해를 발생시키는 주요한 원인 중 하나이다. 우리나라의 최근 재해통계에 따르면 도시홍수의 발생빈도는 점점 잦아지고 있으며, 그 규모 또한 커지고 있다. 하지만 국지성 집중호우는 예측이 어려워 실제 홍수 대응을 담당하는 지자체 공무원들의 업무에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 도시홍수 대응에 시간적 여유 확보를 통한 피해 저감을 위해 양상불 기상예측 자료를 활용한 홍수위험 매트릭스를 구축하고, 그 적용성을 판단하고자 하였다. 홍수위험 매트릭스는 홍수위험도의 정도를 나타내는 잠재적 영향(X축), 위험 기상현상이 발생할 확률인 발생가능성(Y축)으로 구성된 2차원 매트릭스로 확률예보에 기반한 홍수위험 예측 방안이다. 이를 위해 부산 및 대구광역시 내 기초 지자체 각각 1곳을 대상으로 과거 홍수피해기록과 확률강우량 자료를 활용하여 지역별 홍수위험 매트릭스를 구축하고, 과거 호우사상에 대해 기상청의 LENS 자료를 적용하여 그 적용성을 판단하였다. 그 결과 최대 3일전 홍수위험에 대한 예측이 가능한 것으로 분석되었으며 실제 활용 시 홍수 대응시간을 확보하여 피해 저감에 도움이 되리라 판단된다.

핵심용어: 도시홍수, 홍수위험도, 홍수위험 매트릭스, 강우 기상예측

*Corresponding Author. Tel: +82-31-219-2507

E-mail: jeyi@ajou.ac.kr (J. Yi)

1. 서론

최근 우리나라에서 발생빈도가 잦아지고 있는 국지성 집중호우에 의해 도시지역의 홍수 발생이 증가하고 있으며 그 피해 규모 또한 증가하고 있다(Son *et al.*, 2013). 2017년 9월 부산광역시 온천천과 2018년 8월 서울특별시 중랑천 인근 지역에서 집중호우에 의한 홍수피해가 발생하였으며 당시 일 최대강수량은 각각 156.5 mm, 249.5 mm로 기록되었다. 당시 주요 피해를 살펴보면 두 지역 모두 하천 주변 지역 및 도심지, 지하세대 침수 등 큰 재산피해가 있었으며 특히 2018년 8월 중랑천 홍수 시에는 사망 1명, 부상 2명 등 인명피해 또한 발생했다.

도시지역은 다른 지역에 비하여 인구와 재산의 밀집도가 높아 자연재난 발생 시 더 큰 규모의 피해가 발생하게 된다(WMO, 2011). 이러한 도시홍수의 피해를 저감하기 위한 방안으로는 배수펌프장 설치, 하수관로 개량 등 구조적인 방안과 홍수예·경보 등과 같은 비구조적인 방안이 있다(Anderson and Burt, 1985). 이 중 홍수예보에 대해 살펴보면 국내에서는 「수자원 조사·계획 및 관리에 관한 법률 시행규칙 제2조 제4항 제3호」에 따라 국가 및 지방자치체의 55개 주요지점에서 계획홍수량의 50%(홍수주의보), 계획홍수량의 70%(홍수경보)를 기준으로 홍수특보가 발령되고 있다. 이렇듯 국내의 홍수예보는 대하천 위주로 시행됨에 따라 도시지역에서는 국가 홍수예보의 수혜를 받기 어려운 실정이다. 따라서 홍수에 직접적으로 대응하는 기초지자체에서는 매년 지자체 별 ‘홍수해 재난 위기대응 실무 매뉴얼’을 작성하여 홍수에 대응하고 있다. 이 매뉴얼에서는 홍수 위기대응의 단계를 관심, 경계, 주의, 심각 등 4단계로 구분하고 있으며 각 단계는 기상청에서 발령하는 호우특보를 기준으로 구분된다.

기상청의 호우특보는 호우주의보(60 mm/3 hr, 110 mm/12 hr)와 호우경보(90 mm/3 hr, 180 mm/12 hr)로 구분되며 이보다 앞서 기상재해 방지를 위해 수 시간 전에 발표되는 예비특보가 있다. 이러한 호우특보의 경우 전국적으로 모두 같은 기준으로 발령됨에 따라 각 지역의 특성을 반영하고 있지 못하고 있다는 단점이 있다. 특히 특별시, 광역시 내의 ‘구’ 단위 기초지자체의 경우에는 지역 구분 없이 모두 동일한 경보가 발령되어 지역적으로 강우의 편차가 큰 국지성 집중호우 발생 시에는 효율적인 홍수 대응이 어려운 상황이다. 또한 여름철 홍수 대응을 위해 기초지자체에서 가장 큰 관심을 두고 있는 기상청의 호우특보는 강우 발생 전후로 발령됨에 따라 실제 홍수 대응 시간을 확보하는데 어려움이 있다. 이러한 문제들로 각 지자체에서는 여름철 홍수해 대응에 어려움을 겪고 있

으며 이를 해결하기 위해 각 지자체의 특성을 반영한 홍수위험 예보방안과 관련된 연구가 필요한 실정이다.

앞서 기술하였듯이 호우특보의 지역적 차별화와 관련하여 지역별 방재 관련 지표를 활용해 호우특보의 기준을 차등화하는 연구(Park and Kang, 2014), 지역별 설계빈도 강우량 검토를 통한 호우특보의 지역별 적용에 관한 연구(Song *et al.*, 2016)가 수행된 바 있다. 최근 기후변화에 따른 집중호우의 발생이 잦아짐에 따라 도시홍수 예보와 관련된 연구도 국내외적으로 많이 수행되고 있다. Lee (2017)는 강남구 지역을 대상으로 SWMM 및 GIAM (Grid based Inundation Analysis Model) 등의 모형을 활용하여 침수 발생의 강우 임계값을 산정하고 이를 활용하여 침수위험 매트릭스를 산정하였다. 또한 SWMM (Storm Water Management Model)을 활용하여 침수면적 데이터베이스를 구축하고 기상청에서 예보하는 1시간 최대강우량을 활용하여 도시지역의 홍수위험 지역을 사전에 예측하는 연구(Keum *et al.*, 2018), 과거 피해이력 및 UFAM (Urban Flood Analysis Model)을 활용한 도시침수 경보 기준 개선 관련 연구(Choi *et al.*, 2017) 등 물리적 모형을 활용한 연구 등이 수행되었다. Lee *et al.* (2016)은 서울특별시 내 자치구 별로 침수피해 영향인자를 활용하여 호우침수위험도를 예측하는 모델을 개발하였다. 국외에서는 Henonin *et al.* (2013)이 실시간 도시홍수 예측을 위해 사용되는 물리적 모델을 비교·분석하는 연구와 Noymanee *et al.* (2017)은 기계학습 알고리즘을 도입한 도시홍수 예측 관련 연구가 진행되었다.

위와 같은 도시홍수의 예보, 예측 관련 연구를 살펴보면 물리적 모형을 개발한 후 예측 강우를 적용하는 연구가 다수로서 단일값으로 제공되는 결정론적인 강우 예측자료의 정확도가 예보 결과에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 최근 국내외적으로 연구가 활발히 진행되고 있는 영향예보의 개념을 도입하여 도시홍수 예보에 활용하고자 한다. 영향예보(impact forecasting)란 “기상현상으로 인해 예상되는 사회·경제적 영향을 위험 및 취약성을 고려하여 상세한 기상 정보와 함께 전달하는 예보”로 정의(Chung, 2016)되며 기존의 결정론적 예보(deterministic forecasting)와는 다르게 위험기상 현상의 발생확률을 함께 고려하는 확률론적 예보(probabilistic forecasting)방안이다. 홍수와 관련하여 영향예보를 활발히 도입하고 있는 영국 FFC (Flood Forecasting Centre)에서는 영국 전역에 대해 홍수위험 매트릭스(flood risk matrix)를 적용하여 홍수위험도를 예보하고 있다(Pilling, 2016). 본 연구에서는 영국에서 활용 중인 홍수위험 매트릭스 개념을 도입하기 위해 우선 도시지역의 지역별 과거 홍수 피해기록 및 확률강우량을 활용하여 위험단계별 기준 강우량을

산정하였다. 또한 최대 향후 72시간까지 기상예측이 가능한 기상청의 앙상블 기상예측자료 LENS (Limited area ENsemble prediction System)를 활용해 발생확률을 산정하여 홍수위험 매트릭스를 구축하였다. 마지막으로 실제 발생했던 호우사상 적용을 통해 홍수위험 매트릭스 활용 시 홍수 대응 시간을 얼마나 확보할 수 있는지를 평가하여 그 적용성을 판단하였다.

2. 방법론 및 강우 예측자료

2.1 홍수위험 매트릭스(Flood Risk Matrix)

일반적으로 자연재난의 위험도(risk)를 평가하기 위해서는 위해도(hazard), 취약도(vulnerability), 노출도(exposure) 등의 개념이 활용된다. 위해도란 인적, 물적 피해를 발생시킬 수 있는 자연재난의 강도를 의미하며 취약도는 어떤 위해가 발생하였을 때 그 위해에 대한 특정 시스템 또는 재산의 취약 정도, 노출도는 재난 발생 시 재해위험구역 내에 존재하는 인명, 인프라시설, 주택, 산업시설 등 실재하는 모든 재산의 정도를 의미한다. 이 개념들은 홍수위험도 평가에도 적용 가능하며 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다. 또한 위험도를 평가하기 위해 재난의 발생확률과 강도를 함께 고려하는 것이 중요함에 따라 Eq. (1)의 hazard를 Eq. (2)와 같이 발생확률(probability)과 강도(intensity)로 구분할 수 있다(Crichton, 1999; WMO, 2015).

$$Risk = Hazard \times Vulnerability \times Exposure \quad (1)$$

$$Risk = (Probability \times Intensity) \times Vulnerability \times Exposure \quad (2)$$

본 연구에서는 Eq. (2)의 개념을 활용하기 위해 지자체별 과거 홍수피해기록과 확률강우량을 이용하였다. 예를 들어 두 지자체 A, B에 같은 양의 강우가 발생하였을 때 A 지자체가 B 지자체보다 더 큰 피해가 발생했다면 A 지자체는 B 지자체보다 강우에 대한 취약도와 노출도가 높다고 판단할 수 있다. 따라서 개별 지자체의 과거 홍수피해기록을 활용하여 취약도와 노출도가 내포되어 있는 4단계의 기준 강우량(intensity)을 산정하였다. 하지만 과거 피해기록은 과거의 특정 사상에만 영향을 받은 결과일 수 있으며 이러한 불확실성을 감소시키기 위해 확률강우량을 활용하여 기준 강우량을 보정하였다(Fig. 1). 또한 발생확률은 특정 규모의 재난이 발생할 가능성(likelihood)을 의미하며 이를 산정하기 위해 앙상블 기상예측자료를 활용하였다. 최종적으로 위험도는 Eq. (3)과 같이 특정 강도의 재난

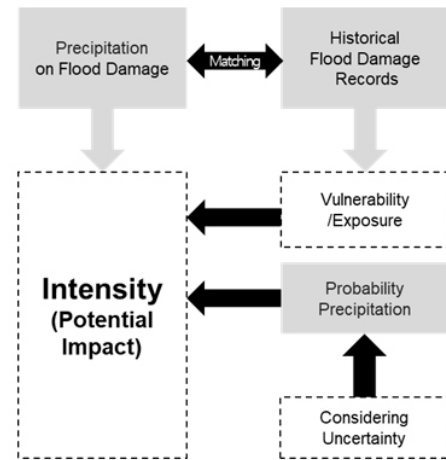


Fig. 1. Conceptual diagram of estimating intensity

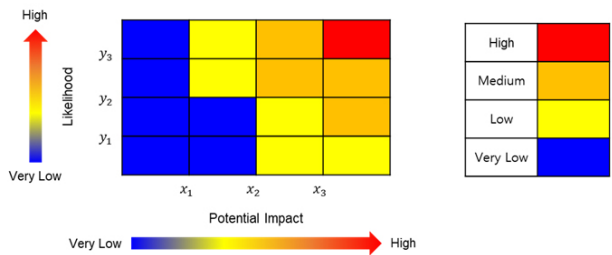


Fig. 2. Flood risk matrix

이야기할 수 있는 잠재적 영향(potential impact)과 발생할 확률(likelihood)의 곱으로 표현할 수 있다. 본 연구에서 구축하고자 하는 홍수위험 매트릭스는 Eq. (3)과 동일한 개념으로 X축의 잠재적 영향과 Y축의 발생가능성으로 표현할 수 있다 (Fig. 2).

$$Risk = Potential Impact \times Likelihood \quad (3)$$

2.2 국지앙상블 예측시스템(LENS)

본 연구에서는 특정 강우량의 발생가능성을 산정하기 위해 기상청의 국지앙상블 예측시스템인 LENS를 활용하였다. LENS는 한반도의 국지규모 위험기상예측을 위해 개발되어 2015년 10월부터 생산되고 있으며 영국 기상청(Met-Office UK)의 앙상블 예측시스템인 MOGREPS-UK에 기반한 모델이다. 수치예보모델(Numerical Weather Prediction, NWP)의 필수요소인 초기장, 경계장, 섭동장은 전지구 앙상블예측 시스템(Ensemble Prediction System for Global, EPSG)에서 제공받고 있다. LENS의 앙상블 멤버 구성은 기준멤버(control member) 1개, 섭동멤버(perturbation member) 12개 등 총 13

개의 앙상블 멤버로 구성되어 있고, 일 2회(00UTC, 12UTC) 예측자료가 생성되고 있다. 이 자료는 1시간 단위로 +72시간 까지 예측이 가능하며, 자료생산 초기에는 3 km의 공간해상도를 가졌으나 2018년 2.2 km로 해상도가 개선되었다(Lee *et al.*, 2015; KMA, 2018).

3. 홍수위험 매트릭스 작성

본 연구에서는 홍수위험 매트릭스의 개발과 적용성 평가를 위해 우리나라의 도시지역 중 부산광역시 동래구와 대구광역시 북구를 선정하였다. 이는 기준 강우량 산정을 위해 2000년 이후 홍수피해기록이 있는 지역, LENS가 생산되기 시작한 2015년 이후 홍수피해가 발생했던 지역을 기준으로 선정하였으며 각 지역의 피해기록은 연도별 ‘재해연보’를 기준으로 하였다.

3.1 잠재적 영향(X축, Potential Impact)

홍수위험 매트릭스의 잠재적 영향(X축)의 단계를 구분 짓기 위하여 본 연구에서는 지역별 과거 피해기록과 확률강우량 자료를 활용하였다. 부산 동래구와 대구 북구 지역의 홍수피

해 기록은 2000년 이후 발간된 재해연보(MOIS, 2000~2016)를 통해 조사하였으며 홍수피해 발생 시 강우량은 기상청 기상관측소 및 환경부 우량관측소 자료를 사용하였다(Table 1). Table 1의 강우량은 피해 기간 중 발생한 지속시간별 최대강우량이며 피해금액은 동일한 기준으로 피해 규모를 판단하기 위해 물가상승률을 고려하여 2016년 기준으로 변환한 값이다. 또한 지역별 확률강우량은 국토교통부 한국확률강우량정보(Korea Precipitation Frequency Data Server)에서 제공하는 자료를 활용하였으며 활용한 자료는 Table 2와 같다.

일반적으로 도시지역의 홍수피해는 단시간에 내리는 집중호우에 큰 영향을 받기 때문에 홍수에 대한 위험을 강우량으로 판단하기 위해서는 짧은 지속시간의 강우량을 기준으로 하는 것이 타당하다. 하지만 본 연구에서 활용하고자 하는 LENS는 수치예보모델로서 모델 자체에 큰 불확실성이 포함되어 있다. 따라서 1시간 단위로 예측, 산출되고 있는 LENS와 실측 강우자료를 비교하면 침투강우의 발생시간에 오차가 발생한다. 이러한 오차를 줄이기 위해 본 연구에서는 1시간 이상의 지속시간 강우량을 사용하고자 하였으며 현재 기상청에서 발령하는 호우특보와 동일한 3시간 지속시간의 강우를 이용하였다.

Table 1. Historical flood damage records in Dongnae-gu and Buk-gu

Municipality	Occurrence Date	Precipitation by duration (mm)			Amount of damage (thousand KRW)
		1 hr	2hr	3 hr	
Dongnae-gu in Busan	2000.07.14. ~ 2000.07.15.	53.0	89.0	94.8	11,421
	2002.08.30. ~ 2002.09.01.	20.0	36.0	48.0	113,334
	2003.07.17. ~ 2003.07.18.	37.0	51.5	56.5	28,430
	2009.07.07. ~ 2009.07.08.	40.0	55.5	75.5	1,815
	2009.07.11. ~ 2009.07.16.	70.0	87.0	110.0	74,927
	2012.07.14. ~ 2012.07.15.	42.0	62.0	74.5	1,314
	2014.08.25. ~ 2014.08.25.	81.5	121.5	142.0	3,737,624
Buk-gu in Daegu	2000.07.22. ~ 2000.07.24.	37.0	52.0	61.0	14,276
	2002.08.30. ~ 2002.09.01.	23.0	36.0	48.0	857,220
	2004.08.17. ~ 2004.08.19.	37.0	59.0	74.0	2,402,060
	2011.07.07. ~ 2011.07.16.	25.5	44.0	54.0	17,232
	2016.07.01. ~ 2016.07.07.	19.5	33.5	33.5	30,000

Table 2. Probability precipitation in Dongnae-gu and Buk-gu (3 hr duration)

Municipality	3 hr Probability precipitation by return period (mm)				
	2 yr	5 yr	10 yr	30 yr	50 yr
Dongnae-gu in Busan	70.5	98.4	117.3	145.2	158.1
Buk-gu in Daegu	51.3	69.0	80.7	98.4	106.5

3.2 발생가능성(Y축, Impact)

위험 강우의 발생가능성을 판단하기 위해 기상청에서 제공받은 LENS는 기준멤버 1개와 섭동멤버 12개로 구성되어 있다. 강우 양상블 자료에서 기준멤버란 관측자료에서 추정된 최상의 초기조건, 경계조건 등을 이용하여 산출된 멤버로 양상블 자료 활용 시 이를 제외한 섭동멤버만을 활용하는 것이 일반적이다(Cheung, 2001). 본 연구에서도 LENS의 섭동멤버 12개 중 기준 강우량을 초과하는 멤버의 개수를 활용하여 발생가능성을 산출하였다. 또한 발생가능성의 임계값은 현재 영국 FFC에서 활용하는 기준과 동일한 값을 적용하여 홍수위험 매트릭스의 활용성을 판단하였다.

3.3 지역별 홍수위험 매트릭스

최종적으로 산정된 부산 동래구와 대구 북구의 홍수위험 매트릭스는 Fig. 3과 같으며 두 지역의 단계별 기준 강우량(X축)에 2배 정도 차이가 있는 것을 알 수 있으며 이는 각 지역의 과거 피해기록과 확률강우량에 기인한 결과이다. 2012년 부산 동래구에서는 74.5 mm/3 hr 강우에 의해 약 130만원 가량의 피해가 발생하였고, 비슷한 시기인 2011년 대구 북구에서는 54.0 mm/3 hr 강우에 의해 1,700만원 가량의 피해가 발생

했다(Table 1). 또한 Table 2와 같이 과거 강우량을 토대로 만들어진 확률강우량에서도 동일 재현기간에 대하여 부산지역의 확률강우량이 대구지역에 비해 더 크다는 것을 알 수 있다. 이렇듯 과거 홍수피해기록과 확률강우량의 차이로 인해 부산 동래구의 기준 강우량이 대구 북구에 비해 더 큰 것으로 확인되었다. 이처럼 지역적 홍수피해 특성을 고려하여 산정된 기준 강우량을 통해 지역적으로 차별된 홍수위험도 예측을 수행하였다.

4. 홍수위험 매트릭스 적용

위에서 구축한 부산 동래구와 대구 북구의 홍수위험 매트릭스 활용성을 평가하기 위해 LENS가 생산되기 시작한 2015년 10월 이후 사상 중 기상청 호우특보가 발령되었던 사상을 기준으로 선정하였다. 또한 도시지역에 큰 피해를 발생시킬 수 있는 집중호우를 대상으로 하였으며 그 결과 각각 2개, 3개의 사상이 선정되었다. 앞서 언급하였듯이 위험도의 판단은 3시간 단위로 판단하되 LENS의 불확실성을 고려하기 위해 하루 중 가장 큰 위험도를 그 날의 발령수준으로 선정하였다. 홍수위험 매트릭스의 적용 결과의 타당성을 평가하기 위해서 위에서 산정한 기준 강우량에 실제 강우량자료를 적용하여 실제 위험도를 판단하고, 기상청의 호우특보를 함께 비교하였다.

4.1 부산광역시 동래구 적용 결과

먼저 2016년 9월 17일 부산광역시 동래구에서 발생한 호우 사상에 적용하였다. 당시 국지성 집중호우로 동래AWS 기준 시간당 최대 18.0 mm의 강우가 발생하였으며 3시간 지속강우량으로는 최대 49.5 mm의 강우가 발생하였다. 이를 활용해 홍수위험도 평가한 결과 9월 17일부터 9월 18일까지 관심(Very Low)단계로 분석되었다. 당시 부산지역에 호우주의보(Advisory)는 9월 17일 08시 15분에 발령되었으며 10시 30분에 호우경보(Warning)로 대치되었고, 17시 30분에 해제되었다. 홍수위험 매트릭스를 활용해 홍수위험도를 예측한 결과 9월 14일 21시에 9월 17일 홍수위험도가 경계(Medium)단계인 것으로 분석되었으며 그 이후로 발령되는 정보에서도 대부분 경계단계로 발령되는 것을 확인하였다(Table 3). 또한 실제 호우가 발생하기 전후로도 관심단계가 발령되었다.

다음으로 2017년 9월 11일 발생한 국지성 집중호우에 적용하였다. 당시 동래AWS 기준 3시간 최대 108.6 mm의 강우가 발생하여 기준 강우량 적용결과 경계단계인 것으로 나타났다. 부산지역에 호우주의보와 경보는 각각 9월 11일 05시 00분, 06시 50분에 발령되었고, 12시 30분에 해제되었다. LENS를

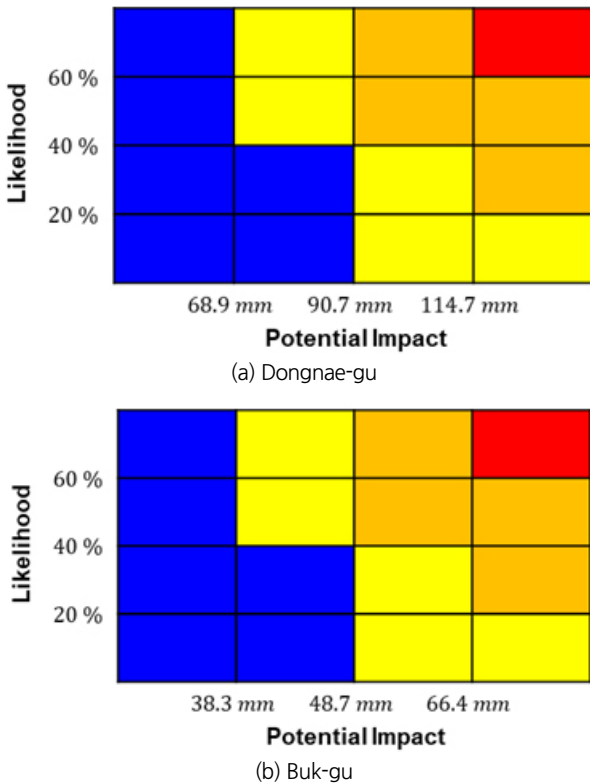


Fig 3. Flood risk matrix of study area

Table 3. Result of application on flood risk matrix of Dongnae-gu (2016.09.17.)

Date		16.09.14.	16.09.15.	16.09.16.	16.09.17.	16.09.18.	16.09.19.	16.09.20.
Historical data					Very Low	Very Low		
Heavy rain alarming (KMA)					Warning			
Flood Risk Matrix (Alarming Time, KST)	16.09.14.09.			Very Low				
	16.09.14.21.			Very Low	Medium			
	16.09.15.09.			Very Low	Very Low			
	16.09.15.21.			Very Low	Medium	Very Low		
	16.09.16.09.			Very Low	Medium	Very Low		
	16.09.16.21.				Medium	Very Low	Very Low	
	16.09.17.09.				Low	Very Low	Very Low	
	16.09.17.21.					Very Low	Very Low	Very Low

1) Shaded cell is forecasting period of LENS

Table 4. Result of application on flood risk matrix of Dongnae-gu (2017.09.11.)

Date		17.09.08.	17.09.09.	17.09.10.	17.09.11.	17.09.12.	17.09.13.	17.09.14.
Historical data					Medium			
Heavy rain alarming (KMA)					Warning			
Flood Risk Matrix (Alarming Time, KST)	17.09.08.09.							
	17.09.08.21.			Very Low	Medium			
	17.09.09.09.				Low			
	17.09.09.21.			Very Low	Very Low	Very Low		
	17.09.10.09.				Low			
	17.09.10.21.				Low			
	17.09.11.09.				Very Low			
	17.09.11.21.							

1) Shaded cell is forecasting period of LENS

홍수위험 매트릭스에 적용한 결과 강우 발생 3일 전인 9월 8일 21시에 실제 홍수위험과 동일한 경계단계를 예보할 수 있는 것으로 나타났으며 그 이후 예측자료를 통해서도 관심단계 및 주의단계를 지속적으로 예보할 수 있었다. 또한 앞선 사상과는 달리 시간적으로 예보의 정확성이 높은 것으로 분석되었다(Table 4).

부산 동래구 지역에 2개 사상을 적용한 결과를 종합적으로 평가해보면 홍수위험 매트릭스를 통해 예보된 홍수위험도 결과가 실제 강우 사상을 적용하여 판단한 홍수위험도와는 약간의 차이가 있었으며 이는 LENS의 예측 정확도에 기인한 결과일 것이라 판단된다. 또한 두 사상에서 모두 LENS 예측강우량이 본 연구에서 제시한 심각(High)단계 기준강우량 보다 작아 관심, 주의, 경계단계만 발령된 것으로 확인되었다. 하지만 집중호우가 발생했던 두 사상 모두 최대 3일 전 홍수위험을 예측할 수 있는 것으로 나타났으며 이를 통해 유관기관이 홍수위험에 대비할 수 있는 시간을 충분히 확보할 수 있을 것으로 판단되었다.

4.2 대구광역시 복구 적용 결과

대구 북구지역에 홍수위험 매트릭스의 활용성을 평가하기 위해서는 부산 동래구와 마찬가지로 집중호우가 발생했던 2016년 9월 17일, 2017년 9월 11일 사상 및 2017년 9월 27일 사상을 추가하여 총 3가지 사상에 대해 결과를 분석하였다. 우선 2016년 9월 17일 대구북구AWS 기준 3시간 최대 37.0 mm의 강우가 발생하였으며 이를 기준 강우량에 적용한 결과 9월 17일 대구북구 지역의 홍수위험도는 관심단계에 들어선 것으로 나타났다. 당시 호우주의보는 9월 17일 07시 00분에 발령되었고, 동일 17시 00분에 해제되었다. 홍수위험 매트릭스에 적용한 결과를 보면 9월 14일 21시에 9월 17일의 홍수위험도를 경계단계로 발령한 것을 시작으로 이후 5개 자료를 통해 관심단계부터 경계단계까지 발령되는 것으로 분석되었다. 또한 시간적으로는 9월 16일 및 9월 18, 19일에 관심단계가 일부 발령되는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 실제 집중호

우가 발생한 9월 17일에는 16, 18, 19일보다 더 높은 단계가 발령되어 홍수위험성을 발령할 수 있었을 것으로 분석되었다 (Table 5).

두 번째로 2017년 9월 11일에는 3시간 최대 25.0 mm의 강우가 발생하였으며 대구지역에 호우주의보는 9월 11일 06시 00분에 발령되었고, 12시 00분에 해제되었다. 실측 강우량을 활용해 실제 대구 북구지역의 홍수위험도를 판단한 결과 관심 단계인 것으로 분석되었고, 홍수위험 매트릭스에 적용한 결과에서는 관심단계부터 경계단계까지 발령된 것으로 나타났다. 하지만 앞선 사상과 달리 9월 11일을 제외한 다른 일자에는 홍수위험도가 예보되지 않아 시간적인 정확성이 높게 나타났다(Table 6).

대구 북구지역에 마지막으로 적용한 2017년 9월 27일 사상은 대구지역에 호우특보가 발생하지는 않았으나 앞선 두 사상만큼의 강우가 발생한 사상이다. 당시 대구북구AWS에서 측

정된 강우량은 시간당 최대 11.0 mm, 3시간 기준 30.0 mm였으며 이를 기준 강우량에 적용한 결과 관심단계인 것으로 분석되었다. 이 사상에 대해 홍수위험 매트릭스에 적용한 결과 9월 24일부터 9월 27일까지 모두 관심단계를 예보할 수 있는 것으로 분석되었으며 시간적으로도 다른 사상에 비해 가장 예측이 우수한 것으로 분석되었다(Table 7).

대구 북구지역의 홍수위험 매트릭스 적용결과 부산 동래구 적용결과와 마찬가지로 실제 홍수위험도와 발령된 홍수위험도에는 약간의 차이가 발생하였다. 또한 부산 동래구와 마찬가지로 대구 북구 LENS 예측강우량 또한 본 연구에서 제시한 심각단계 기준강우량 보다 작아 관심, 주의, 경계단계만 발령되었다. 하지만 3가지 사상 모두 집중호우가 발생한 날의 홍수위험도를 최대 3일 전에 예측할 수 있는 것으로 분석되었다. 이를 통해 홍수위험에 대비할 수 있는 시간을 충분히 확보할 수 있을 것으로 판단되었다.

Table 5. Result of application on flood risk matrix of Buk-gu (2016.09.17.)

Date		16.09.14.	16.09.15.	16.09.16.	16.09.17.	16.09.18.	16.09.19.	16.09.20.
Historical data					Very Low			
Heavy rain alarming (KMA)					Warning			
Flood Risk Matrix (Alarming Time, KST)	16.09.14.09.			Very Low				
	16.09.14.21.			Very Low	Medium			
	16.09.15.09.			Very Low	Low			
	16.09.15.21.			Very Low	Low	Very Low		
	16.09.16.09.			Very Low	Low	Very Low		
	16.09.16.21.				Medium		Very Low	
	16.09.17.09.				Very Low		Very Low	
	16.09.17.21.					Very Low		

1) Shaded cell is forecasting period of LENS

Table 6. Result of application on flood risk matrix of Dongnae-gu (2017.09.11.)

Date		17.09.08.	17.09.09.	17.09.10.	17.09.11.	17.09.12.	17.09.13.	17.09.14.
Historical data					Very Low			
Heavy rain alarming (KMA)					Advisory			
Flood Risk Matrix (Alarming Time, KST)	17.09.08.09.							
	17.09.08.21.				Low			
	17.09.09.09.				Low			
	17.09.09.21.				Medium			
	17.09.10.09.				Low			
	17.09.10.21.				Low			
	17.09.11.09.				Very Low			
	17.09.11.21.							

1) Shaded cell is forecasting period of LENS

Table 7. Result of application on flood risk matrix of Dongnae-gu (2017.09.27.)

Date	17.09.24.	17.09.25.	17.09.25.	17.09.27.	17.09.28.	17.09.29.	17.09.30.
Historical data				Very Low			
Heavy rain alarming (KMA)							
Flood Risk Matrix (Alarming Time, KST)	17.09.24.09.						
	17.09.24.21.			Very Low			
	17.09.25.09.			Very Low			
	17.09.25.21.			Very Low			
	17.09.26.09.			Very Low	Very Low		
	17.09.26.21.				Very Low		
	17.09.27.09.				Very Low		
	17.09.27.21						

1) Shaded cell is forecasting period of LENS

5. 결론

본 연구에서는 여름철 집중호우에 의한 도시지역의 홍수 위험에 대한 대응시간을 확보하여 피해를 저감시키기 위한 방안으로 지역별 홍수위험 매트릭스를 구축하고 양상불 기상 예측 자료를 활용하여 적용성을 평가하고자 하였다. 연구대상 지역은 부산광역시 동래구와 대구광역시 북구지역을 선정하였으며 두 지역의 과거 홍수피해기록과 확률강우량 자료를 통해 홍수위험 매트릭스의 기준 강우량(X축)을 산정하였다. 또한 위험기상 현상의 발생가능성(Y축) 산정을 위해서는 기상청에서 제공하는 양상불 기상예측자료인 LENS를 활용하였다. 구축된 두 지역의 홍수위험 매트릭스 평가를 위해서는 2016년 이후 발생한 집중호우를 대상으로 부산 동래구와 대구 북구에 각각 2개, 3개의 강우사상을 선정하였으며 결과의 적용성을 판단하기 위해 실측 강우량을 기준 강우량에 적용한 결과와 당시 각 지역에 발표되었던 호우특보를 함께 비교하였다.

홍수위험 매트릭스의 적용지역으로 선정한 부산 동래구와 대구 북구지역에 대해 기준 강우량(X축)을 산정한 결과 부산 동래구의 기준 강우량이 대구 북구지역에 비해 약 2배 가량 큰 것으로 나타났다. 두 지역의 과거 피해기록을 비교해본 결과 강우량의 큰 차이가 없음에도 부산 동래구에 비해 대구 북구의 피해금액이 더 큰 것으로 나타났으며, 확률강우량 또한 부산 동래구가 대구 북구에 비해 더 큰 것으로 나타났다. 즉 동일 강우량에 대한 취약도는 부산 동래구보다 대구 북구지역이 더 크며, 피해 강우에 대한 노출도는 대구 북구지역이 더 큰 것으로 판단되었다. 이러한 이유로 기준 강우량 산정결과에 차이가 발생하였으며 각 지역의 취약도와 노출도를 고려한 지역 별 기준 강우량을 산정되었다고 판단할 수 있었다.

양상불 기상예측자료인 LENS를 부산 동래구의 홍수위험 매트릭스에 적용한 결과 실측 강우량을 통해 산정된 홍수위험도와 홍수위험 매트릭스를 통해 예측된 홍수위험도가 사이에 양적인 차이가 있었다. 하지만 실제 집중호우가 발생하여 홍수위험이 발생하기 최대 3일 전 미리 홍수를 예보할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 대구광역시 북구 적용결과 동래구 적용결과와 같이 홍수위험도의 양적인 차이는 존재하였으나 3일 전 홍수위험의 예보는 가능할 것으로 판단되었다. 본 연구에서 적용한 집중호우는 강우의 양과 시간 예측이 어려움에 따라 홍수 대응에 필요한 물자 및 인원확보, 시설점검 등에 소요되는 시간 확보가 어렵다. 하지만 연구결과에서 알 수 있듯 홍수위험도 예측에 홍수위험 매트릭스를 활용할 경우 최대 3일 전 홍수위험을 전망할 수 있으며 이 정보를 제공함으로써 지역 별 홍수 대응 담당자의 대응시간 확보 및 홍수피해 저감이 가능할 것으로 판단된다.

양상불 기상예측 자료를 활용하여 도시지역의 홍수위험도를 예측하기 위해 진행한 이 연구는 현재 수집된 LENS 자료만을 활용하기 위해 2016년, 2017년 사상만을 활용하여 홍수위험 매트릭스의 활용성을 판단하였다. 향후 연구에서는 더 많은 지역을 대상으로 장마, 태풍 등 다양한 사상을 적용하여 그 활용성을 판단할 예정이며 현재 FRM에 적용한 영국의 발생 확률 임계값을 우리나라에 실정에 맞게 수정, 보완할 것이다. 또한 현재 강우량만을 활용하여 홍수위험 매트릭스를 구축하였으나 향후 유출해석을 통한 도시하천의 예측 홍수량을 산출하고 이를 활용하여 홍수량 기반의 홍수위험 매트릭스를 구축할 계획이다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물 관리연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2019002640001).

References

- Anderson, M. G., and Burt, T. P. (1985). *Hydrological forecasting*. John Wiley & Sons, New York. pp. 32-63.
- Cheung, K. K. (2001). "A review of ensemble forecasting techniques with a focus on tropical cyclone forecasting." *Meteorological Applications*, Vol. 8, No. 3, pp. 315-332.
- Choi, C. W., Jung, D. J., Cho, J. W., Kang, H. S., Bae, C. Y., and Kim, M. J. (2017). *Development of advanced technique for urban flood alert criteria*. NDMI-PR-2017-01-02, National Disaster Management Institute, Ulsan, South Korea.
- Chung, K. Y. (2016). "Vision and direction of impact forecasting." *Meteorological Technology & Policy*, Vol. 9, No. 1, pp. 6-22.
- Crichton, D. (1999). *The risk triangle*. Natural Disaster Management, Ingleton, J.,(ed.), Tudor Rose London.
- Henonin, J., Russo, B., Mark, O., and Gourbesville, P. (2013). "Real-time urban flood forecasting and modelling-a state of the art." *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 15, No. 3, pp. 717-736.
- Keum, H. J., Kim, H. I., and Han, K. Y. (2018). "Real-time forecast of rainfall impact of urban inundation." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 21, No. 3, pp. 76-92.
- Korea Meteorological Association (KMA) (2018). *2018 Year book on meteorological*. Korea Meteorological Association, Seoul, South Korea.
- 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.
- Lee, H. J., Ryu, S. H., Won, S. H., Jo, E. J., Kim, S. W., and Joe, G. H. (2016). "A study on model of heavy rain risk prediction using influencing factors of flood damage." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 3, pp. 39-45.
- Lee, S. W., Park, J. H., and Kim, D. J. (2015). "Limited area ensemble prediction system(LENS) in KMA toward early warning system for high impact weather." *Proceeding of the Autumn Meeting of KMS*, pp. 237-238.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS) (2000-2016). *2000~2016 Disaster annual report*.
- Noymanee, J., Nikitin, N. O., and Kalyuzhnaya, A. V. (2017). "Urban pluvial flood forecasting using open data with machine learning techniques in Pattani basin." *Procedia computer science*, Vol. 119, pp. 288-297.
- Park, S. S., and Kang, B. S. (2014). "Differentiating scheme for the storm warning criteria considering the regional disaster prevention capacity." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 5, pp. 67-76.
- Pilling, C. (2016). "New developments at the Flood Forecasting Centre: operations and flood risk guidance." *WIT Transactions on The Built Environment*, Vol. 165, pp. 237-248.
- Son, M. S., Park, J. Y., and Kim, H. S. (2013). "Urban environmental risk-evaluating flooding risk indices of Seoul." *Seoul Studies*, Vol. 14, No. 4, pp. 127-140.
- Song, Y. S., Lim, C. H., Joo, J. G., and Park, M. J. (2016). "A study on heavy rain forecast evaluation and improvement method." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 2, pp. 113-121.
- World Meteorological Organization (WMO) (2011). *Manual on flood forecasting and warning*. WMO-No. 1072, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- World Meteorological Organization (WMO) (2015). *WMO guidelines on multi-hazard impact-based forecast and warning Services*. WMO-No. 1150, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.