기후변화 및 도시화에 따른 도시유출특성 분석: 복대동 유역을 대상으로

Analysis of Urban Runoff Discharge Characteristics Affected by Climate Change and Urbanization: Case on Bokdae-dong Basin

이보람* · 정대명** · 최성열***

Lee, Bo-Ram*, Jeong, Dae Myoung**, and Choi, Sung Yeol***

Abstract

This study conducted an analysis on the characteristics of leakage due to climate change and urbanization in Bokdae-dong, Heungdeok-gu, Chungju, Chungcheongbuk-do, which suffered flooding on July 16, 2017. The rainfall amount, considering climate change and increased by urbanization, was added and analyzed in proportion to the existing area. Results of the analysis showed that the increase in rainfall and the impervious rate increased the urban runoff discharge, sink depth, and flood area. The variation in rainfall rate, rather than a change in the impervious area, led to a clear change in the characteristics of the urban runoff discharge. In addition, the fluctuation of the outflow upstream characteristics of the watershed was increased by the increase in rainfall, and the fluctuation of the downstream outflow characteristics was increased by the increase in impervious area. This study will be helpful in planning future flood mitigation strategies by changing parameters in urban runoff discharge models. This will facilitate the analyses of runoff characteristics of urban watersheds and the runoff characteristics of the future urban watershed.

Key words : Climate Change, Urbanization, Urban Outflow Model

요 지

본 연구에서는 2017년 7월 16일 침수피해를 입은 충청북도 충주시 흥덕구 복대동을 대상지역으로 기후변화 및 도시화에 따른 유출특성 분석을 수행하였다. 기후변화를 고려한 강우량과 도시화에 의해 증가되는 불투수면적을 기존 대상지역보다 비율로써 가감하여 분석하였다. 분석결과, 강우량 및 불투수율 증가에 의해 도시의 유출량 및 침수심, 침수면적이 증가하였고, 불투수율면적 변동보다 강우량의 변동이 도시유출특성의 변화를 뚜렷하게 보여주었다. 또한, 강우량 증가에 의해서는 유역 상류에서의 변동이 크게 나타났고, 불투수율 증가에 의해서는 하류에서의 유출특성 변동이 크게 나타났다. 본 연구는 도시유출모형에서의 매개변수를 변화하여 도시유역의 유출특성 분석 수행 및 미래 도시유역의 유출특성을 분석함으로써 추후 미래의 침수 저감 방안 산정시 도움이 될 것으로 판단된다.

핵심용어 : 기후변화, 도시화, 도시유출모형

1. 서 론

국내 도시화율이 1960년 39.1%에서 2014년 기준 91.7%가

지 확대되었다(MOLIT, 2015). 같은 기간, 자연재해 피해 또한 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 국내 자연재해피해 추이를 살펴보면, 최근 10년('99~'08) 동안 자연재해로 인해

*정회원, (주)방재안전기술원 연구원(E-mail: borm6912@naver.com)

Member, Researcher, Disaster Prevention Safety Institute, Inc

**정회원, (주)방재안전기술원 대표이사(E-mail: sign007@nate.com)

Member, CEO, Disaster Prevention Safety Institute, Inc

***교신저자, 정회원, (주)방재안전기술원 공학박사(Tel: +82-70-5226-0390, Fax: +82-70-4015-3110, E-mail: sixbong777@gmail.com)

Corresponding Author, Member, Ph.D. in Civil and Environmental Engineering, Disaster Prevention Safety Institute, Inc

연평균 약 1.9조 원의 재산피해를 경험했으며, 이는 과거 20년('79~'98) 연평균 피해액의 약 6배에 달한다(MPSS, 2009; Kang et al., 2011). 도시화에 따라 자연재해 피해가 확대되고 있으며, 그 둘의 상관성은 국내외 자연재해 사례를 분석하면 더 명확해진다.

도시화는 인구의 집중에 따른 도시 공간의 변화 양상을 일컫는 개념이다(Statterthwaite, 2011). 특히 도시화가 활발히 진행되었던 산업혁명 이후 도시산업발전을 위해 공장을 건설하고 몰려드는 인구의 거주지를 확충하며 생산한 제품을 수송하기 위한 교통망 정비 등이 주된 도시의 활동이라 할 수 있다(Mair, 1986). 따라서 도시의 기반시설은 건설이 용이하고, 내구성이 강한 재료로 채워지기 시작하였고 기술이 발달함에 따라 시멘트, 아스팔트의 종류가 주를 이루는 회색 도시화(Gray City)가 진행되었다(Dekay and O'brien, 2001). 이러한 재료는 내구성이 강하고 작업이 편리한 장점이 있으나 투수력이 없어 집중강우 시 빗물이 지표 위로 급격히 흐르는 현상(Runoff)을 유발한다(U.S. EPA, 2013).

Choi (2004)은 도시화가 자연재해 피해에 결정적인 변수로 영향을 미치는 것으로 분석하였으며, 도시화는 불투수면적, 자연재해는 홍수피해액으로 각각 정의하여 분석하였다. 이 외의 연구에서도 자연재해 피해를 산정하기 위해 사용한 조작적 정의로 홍수피해액을 제시하였으며, 자연재해피해에 미치는 독립 변수로 불투수면적을 사용하고 있다(Brody et al., 2007).

침투유출량에 소요되는 시간은 주로 유역경사, 유로연장, 수심, 유로의 조도 등에 의해 결정되며 침투유출량은 이러한 유역특성변수들과 유역면적, 개발지역의 위치 수공구조물의 설치, 강우의 시간적인 분포 등에 따라 달라지게 된다. 일반적으로 자연상태의 유역을 개발하는 것은 유역 특성인자의 변화로 인해 불투수면적이 증대되고 우수의 지하 침투량은 감소하여 보유력의 약화로 토양침식, 침투유량, 유출량은 증대된다.

본 연구의 목적은 기후변화 및 도시화에 따른 도시홍수유출특성을 분석하는 것이다. 도시홍수유출특성에 영향을 미치는 인자는 매우 다양하고 복잡하나, 그 중 기후변화에 의한 강우량과 도시화에 의한 불투수율 면적을 증감하여 모형에 적용하고, 침투홍수량, 침투홍수량 발생시간, 침수심, 침수면적의 변화를 검토하였다. 추후 미래의 침수 저감 방안 산정시 도움이 될 것으로 판단된다.

2. 대상지역 및 강우

2.1 대상지역 현황

본 연구의 대상지역은 2017년 7월 16일 침수피해를 입은 충청북도 충주시 흥덕구 복대동으로 금강하류 제1지류인 미호천이 흐른다.

미호천은 충청북도 음성군 삼성면 마이산(EL. 471.9 m)에

서 발원하여 진천·청주·연기군을 지나 금강의 우안으로 합류하는 금강의 제 1지류로서 국가하천과 지방하천으로 구분된다. 미호천 수계내 주요 지류하천으로는 백곡천, 보강천, 무심천, 병천천, 조천 등이 있다.

대상지역의 면적은 3.51 km²이며, 관망은 노드 103개와 링크 101개로 구축하였다.

2.2 강우자료

본 연구는 불투수면적의 증가와 기후변화에 따른 향후 침투유출량의 변화를 알고자 하는데 목적이 있어 '미래 기후 변화 영향 등을 고려한 지역별 방재성능목표 설정·운영 기준(MOIS, 2017)'의 방재성능목표 강우량을 이용하였다.

방재성능목표 강우량이란 한국확률강우량도(MLTM, 2011)에서 제시한 69개 기상관측소를 기준으로 전국을 169개 티센망으로 구축한 후 기상자료 개방포털(기상청)의 강우 관측자료(~'15)를 활용하여 각 기상관측소가 위치한 해당 지역별로 재현기간 30년 빈도 상당의 확률강우량을 산정한 것이다. 산정된 지역별 확률강우량에 기후변화로 예측되는 미래 강우 증가율을 고려하여 기본 할증률 5%를 적용하여 최종 산정한다.

본 연구에서는 방재성능목표 강우량 1시간을 활용하였으며, Huff 3분위로 시간분포하여 적용하였다(Table 1).

Table 1. Disaster Prevention Performance Target Rainfall in Cheongju

Disaster Prevention Performance Target Rainfall		
1 hours	2 hours	3 hours
80 mm	110 mm	135 mm

3. 모형의 개요 및 적용

3.1 SWMM

Storm Water Management Model (SWMM)모형은 도시유역이나 인위적인 배수계통을 갖는 유역을 대상으로 강우-유출해석시 사용하는 모형으로, 강우사상으로 발생하는 유출량과 오염물질의 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망의 유출량 추적, 저류량 산정, 오염물질의 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다(Huber and Dickinson, 1988).

SWMM은 4개의 실행블록과 5개의 보조블록을 가지고 있으며, 실행블록은 유출과 관련된 RUNOFF Block, 하도내 수질을 모의하는 TRANSPORT Block, 하도의 수리 수문 기작을 정밀하게 표현할 수 있는 EXTENDED TRANSPORT (EXTRAN) Block, 처리시설 기작을 반영할 수 있는 STORAGE와 TREATMENT Block으로 구성되어 있다.

SWMM모형을 사용하기 위해서는 입력데이터로 여러 종류의 매개변수가 필요하다. 매개변수는 물리학적 매개변

수와 수문학적 매개변수로 구분할 수 있다. 물리학적 매개변수는 소유역의 면적, 유역의 평균경사, 불투수율(%)과 같은 소유역 관련 매개변수와 하도 및 관망의 깊이, 관경 또는 하도의 폭, 하도의 경사와 같은 배수체계 관련 매개변수를 의미하며, 수문학적 매개변수는 Manning계수, 유역의 표면저류, 침투관련 매개변수, 유역 폭과 같은 매개변수를 뜻한다. Table 2에 SWMM 모형에서의 주요 매개변수를 정리하여 나타내었다.

3.2 모형의 적용

본 연구에서는 2017년 7월 16일의 실측치를 기준으로 매개변수 최적화된 SWMM모형을 이용하였으며, 유출특성에 영향을 미치는 인자 중 기후변화에 따른 강우량 및 도시화에 따른유역의 불투수면적율을 조정하여 유출영향인자의 변화에 따른 주요 지점의 침투홍수량, 침투홍수량 발생시간, 침수심과 침수면적의 변화를 분석하였다.

MOIS (2017)에 따르면 미래 강우 증가율을 고려하여 관심 · 주의여부에 따라 10%까지 할증률을 주었다. 이를 참고하여 강우량 및 불투수면적율을 10%, 20% 증감하여 분석하였다.

북대동 유역의 주요지점은 충북대학교 정문 지점(P1), 산업단지 육거리 지점(P2), 유역최하류 지점(P3)으로 분류하였고 각 주요지점은 Fig. 1과 같다.

3.2.1 강우량

강우량 변화에 따른 북대동 유역의 유출특성 변화를 확인하고자 청주시 방재성능목표강우량 1시간(80 mm)을 기준으로 10%, 20% 증가 및 감소함에 따른 침투홍수량, 침투홍수량 발생시간, 침수심 및 침수면적의 변화를 분석하였다.

Fig. 1. Main Location Map of Bokdong-dong Basin

침투홍수량과 침투홍수량 발생시간을 분석한 결과, 강우량을 10% 증감시 최대 6CMS, 20% 증감시 최대 12CMS의 침투홍수량 차이가 발생하였고, 침투홍수량 발생시간의 경우 강우량 변화에 따라 최대 5분의 차이가 발생하였다 (Table 3).

최대 침수심 및 침수면적 분석결과 Table 4와 같으며, 강우량을 20% 감소시켰음에도 최대 침수심이 0.812 m, 침수면적이 84,721 m²로 여전히 내수침수가 발생할 것으로 분석되었다. 강우량을 감소시켰을 때 최대침수심은 최대 0.112 m 감소를 나타냈으나, 강우량을 증가시켰을 때는 최대 0.100 m로 강우량 증감에 따라 유출 침수심의 변화가 크지 않은 것으로 확인되었다. 허나 침수면적의 경우 강우량 증가에 따라 최대 20,723 m² 증가하여, 최대 침수심보다 침수면적의 변화가 큼을 알 수 있다.

Table 2. Key Parameters of the SWMM Model

Division	Parameters		Coverage and Calculation method
Rainfall related parameters	Initial infiltration capacity		Horton's equation
	Ground retention	Impervious	Packaged watershed: 0.013~0.40, House top: 0.13~0.80, Use existing data
		Infiltration	Lawn: 0.50 ~ 1.25, Forest: 0.50 ~ 1.50, Use existing data
Basin-related parameters	Watershed width		$W = (2 - S_k) \cdot L$, Estimation using topographic data
	Impervious area ratio		Calculated using aerial photographs and land use maps
	Watershed slope		Watershed slope = height difference / length of channel and calculated by equivalent slope method
	Roughness coefficient	Impervious	Residential area: 0.025 ~ 0.055, Commercial and Industrial area: 0.015 ~ 0.035, Use existing data
		Infiltration	Plains, forests, lawns, arable land, pastures, etc.: 0.020 ~ 0.080, Use existing data
Pipe related parameters	Pipe length		Calculated using GIS or topographic data
	Pipe slope		Calculated using GIS or topographic data
	Roughness coefficient		Concrete: 0.011 ~ 0.015, Steel pipe: 0.011 ~ 0.014, Use existing charts

Table 3. The Results of Peak Flood Amount and Peak Flood Time According to Rainfall

Location	Rainfall	1D			
		Peak flood time (hour: minute)		peak flood amount (CMS)	
Chungbuk National University entrance (P1)	-20%	0:52	-	40.219	-7.330
	-10%	0:52	-	45.302	-3.515
	present	0:52	-	49.101	-
	+10%	0:52	-	55.238	6.644
	+20%	0:57	▼(5min)	59.847	12.455
Industrial complex Six streets (P2)	-20%	1:04	-	36.531	-6.741
	-10%	1:04	-	40.696	-3.407
	present	1:04	-	44.370	-
	+10%	1:09	▼(5min)	48.793	4.793
	+20%	1:14	▼(10min)	52.621	9.425
The lowest point of the watershed (P3)	-20%	1:22	▲(5min)	33.484	-6.180
	-10%	1:16	-	37.387	-3.094
	present	1:16	-	40.719	-
	+10%	1:16	-	44.646	4.239
	+20%	1:16	-	48.186	8.501

Table 4. The Results of Maximum Flooding Height and Flooding Area Analysis According to Rainfall

Loca--tion	Rainfall	2D			
		Maximum Flooding height (m)		Flooding area (m ²)	
Total	-20%	0.812	-0.112	84,721	-12,354.1
	-10%	0.895	-0.029	90,786	-6,288.86
	present	0.924	-	97,075	-
	+10%	1.002	0.078	112,013	14,938.13
	+20%	1.024	0.100	117,799	20,723.57

3.2.2 불투수율

복대동 유역의 불투수율 변화에 따른 유출특성 분석을 위해 앞서 구축된 모형을 기준으로 10%, 20%를 증감하였으며, 현재 불투수율이 0%인 지역과 불투수율이 100%인 지역의 경우 증감을 적용하지 않았다.

불투수율 변화에 따른 침투홍수량 및 침투홍수량 발생시간 분석결과, 현재를 기준으로 P2은 불투수율을 20% 증가시켰을 때 1.7CMS 증가하고, 불투수율을 20% 감소시켰을 때 1.9CMS 감소하여 가장 큰 변화를 나타냈다. 침투홍수량의 발생시간은 불투수율 변화에도 대체적으로 동일하거나 최대 5분의 차이를 보여 복대동 유역의 경우, 불투수율의 변화가 침투홍수량의 발생시간에 많은 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다(Table 5).

불투수율이 증감에 따라 평균 1,244 m²의 침수면적의 변화가 발생하였으며, 최대침수심은 불투수율 20% 감소시 0.113 m의 감소로 큰 변화를 보이지 않았다. 불투수율을

증가시켰을 때보다 불투수율을 감소시켰을 때 최대침수심의 기울기가 급격하게 감소하였고, 침수면적의 경우 불투수율 변화에 따라 균일한 증가 경향을 나타내었다(Table 6).

4. 결 론

본 연구에서는 복대동 유역을 대상으로 2017년 7월 16일의 침수양상과 XP-SWMM 모형을 통해 산정된 침상예상도를 비교하여 최적화 모형임을 확인한 후, 강우량 및 불투수율 변화에 따른 유출특성을 검토하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 강우량 변화에 따른 분석결과 10% 증감시 최대 6CMS, 20% 증감시 최대 12CMS의 침투홍수량 차이가 발생하였으며, 강우량을 20% 감소시켰음에도 최대 침수심이 0.812 m, 침수면적이 84,721 m²으로 여전히 내수침수

Table 5. Analysis of Peak Flood Amount and Peak Flood Time According to Impervious Rate

location	Rainfall	1D			
		Peak flood time (hour: minute)		peak flood amount (CMS)	
Chungbuk National University entrance gate (P1)	-20%	0:52	-	48.735	-0.366
	-10%	0:52	-	48.958	-0.143
	present	0:52	-	49.101	-
	+10%	0:52	-	51.027	1.926
	+20%	0:52	-	51.631	2.530
industrial complex Six streets (P2)	-20%	1:09	▼(5min)	42.481	-1.889
	-10%	1:09	▼(5min)	43.886	-0.484
	present	1:04	-	44.370	-
	+10%	1:04	-	45.026	0.656
	+20%	1:04	-	46.070	1.700
The lowest point of the watershed (P3)	-20%	1:21	▼(5min)	39.197	-1.522
	-10%	1:16	-	40.259	-0.460
	present	1:16	-	40.719	-
	+10%	1:16	-	41.358	0.639
	+20%	1:16	-	42.324	1.605

Table 6. The Results of Maximum Flooding Height and Flooding Area Analysis According to Impervious Rate

Loca--tion	Rainfall	2D			
		Maximum Flooding height (m)		Flooding area (m ²)	
Total	-20%	0.811	-0.113	95,390	-1,685
	-10%	0.853	-0.071	96,348	-727
	present	0.924	-	97,075	-
	+10%	0.982	0.058	98,067	992
	+20%	1.004	0.080	98,648	1,573

가 발생하고 있어 복대동 유역은 치수적으로 취약한 지역임을 확인하였다.

- (2) 불투수율 변화에 따른 분석결과 현재를 기준으로 충북대학교 정문 지점(P1)은 20% 증가시켰을 때 2.5CMS, 산업단지 육거리 지점(P2)은 20% 감소시켰을 때 1.8CMS, 유역최하류 지점(P3)는 20% 증가시켰을 때 1.6CMS로 가장 큰 차이를 보였다. 불투수율이 증가함에 따라 평균 1,244 m²의 침수면적의 증가와 최대침수심은 평균 0.0805 m의 증가로 큰 변화를 보이지 않았다.
- (3) 매개변수를 10~20%의 증감을 시켰을 때 강우량의 변화로 인해 보여진 침투홍수량 12.45CMS, 최대침수심 0.112 m, 침수면적 20,723 m²으로 불투수율의 변화가 침투홍수량 최대 2.53CMS, 최대침수심 0.113 m, 침수면적 1,685 m²의 변화보다 큰 영향을 미친 것을 확인할 수 있었다.

본 연구는 도시유출모형에서의 매개변수를 조정하여 도시유역의 유출특성 분석 수행 및 미래 도시유역의 유출특성을 분석하였다. 그러나 매개변수를 같은 비율로 증감하여 검토하는 것은 지역적인 특성이 반영되어있지 않으므로, 추후 지역적 특성을 반영하여 매개변수를 조정하고 나아가 도시화와 강우량의 개별적 인자가 아닌 복합적인 인자를 고려했을 때의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 18AWMP-B083066-05).

References

Brody, S.D., Zahran, S., Highfield, W.E., Grover, H., and

- Vedlitz, A. (2007). Identifying the impact of the built environment on flood damage in Texas. *Disasters*, Vol. 32, No. 1, pp. 1-18.
- Choi, C.Y. (2004). *Panel models about determining factors of urban flood damages in Korea and policy implications*. Ph.D. dissertation, Seoul National University.
- Dekay, M., and O'brien, M. (2001). Grey City, Green City. *Forum for Applied Research and Public Policy*, Vol. 16, No. 2, pp. 19-27.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2013). *Water-smart landscapes*. Washington, DC, USA.
- Huber, W.C., and Dickinson, R.E. (1988). *Storm water management model, version 4: User's manual*. Ver. 2.1, U.S. Army Corps of Engineers.
- Kang, J.E., Lee, M.J., Goo, Y.S., Jo, G.W., and Lee, J.W. (2011). *Urban renewal strategy for adapting to climate change: Use of green infrastructure on flood mitigation*. Report No. 2011-07, Korea Environment Institute.
- Mair, A. (1986). The homeless and the post-industrial city. *Political Geography Quarterly*, Vol. 5, No. 4, pp. 351-368.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2015). *Urban planning statistics*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2011). *Improvement and supplement of probability rainfall in South Korea*.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2017). *Establishment and operation standard of disaster prevention performance by region*.
- Ministry of Public Safety and Security (MPSS). (2009). *Disasters report*.
- Satterthwaite, D. (2011). How urban societies can adapt to resource shortage and climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 369, pp. 1763-1783.

Received	December 06, 2018
Revised	December 10, 2018
Accepted	January 10, 2019