

기후변화와 도시화에 따른 도시유역 CSOs 발생에 관한 비교연구

A Comparative Study on the Change of CSOs in Urban Area according to Climate Change and Urbanization

류성수*, 전환돈**, 류관형***, 김민석****, 김종훈*****

Seong Su Ryu, Hwan Don Jun, Gwan Hyeoung Ryu, Min Seok Kim, Joong Hoon Kim

Abstract

최근 국내외 많은 연구자들에 의해 기후변화와 도시화에 따른 기후특성의 변화에 대한 다양한 연구들이 진행되고 있으며 이러한 연구들은 주로 기후변화와 도시화의 영향으로 강수량이 증가하는 쪽으로 변화한다는 연구결과를 발표하였다. 강우특성의 변화는 필연적으로 유출의 특성에도 영향을 미치게 되며, 유출의 변화는 소규모 수공구조물의 안전성과 CSO 처리시설 등의 용량산정 등에 있어서 필히 검토되어야 하는 문제이다.

이에 따라 본 연구에서는 현재 서울 기상청에 구축되어 있는 장기간의 실측 시강우자료(Data 1, 1961년-2006년 4-10월)와 특성변화가 진행되었다고 판단되는 1990년 이후의 강우자료(Data 2, 100년치 4-10월 모의 발생)를 이용하여 대상유역의 유출량 및 CSOs 발생량을 산정하였다. 모의강우에 의해 산정된 유출량 및 CSOs 발생량은 전기간 강우자료를 이용하여 산정한 것보다 비초과확률 0.8, 0.5에 대하여 각각 $317.6 \times 10^3 m^3$, $135.9 \times 10^3 m^3$ 크게 산정되었으며, CSOs 발생량은 $176.9 \times 10^3 m^3$, $72.3 \times 10^3 m^3$ 크게 산정되었다.

Key words : 강우특성 변화, 강우모형, CSOs

1. 서론

최근 기후변화와 도시화의 영향으로 수문인자의 특성변화에 대한 다양한 연구들이 진행되고 있다. Whetton(1993) 등 많은 연구자들이 GCM(General Circulation Model)을 이용하여 기후변화에 따른 CO₂변화로 강수량이 증대되고 이로 인해 홍수량의 변화가 예상된다고 하였다. 유철상 등(2007)은 도시화의 간섭분석을 실시하여 간섭분석 결과를 바탕으로 판단할 때 극한호우사상에 상당한 영향을 끼치며 도시화에 의한 강우특성의 변화는 향후에도 계속될 것으로 판단된다고 하였다. 이처럼 관련 연구들로부터 기후변화와 도시화에 의한 수문특성의 변화가 있는 것으로 결론짓고 있으며, 특히 강우특성의 변화는 유출에 대해 직접적인 변화를 가져오게 되므로, 강우특성 변화에 따른 고려가 필요할 것으로 판단된다(Mohseni and Stefan, 1998). 이에 따라 본 연구에서는 강우특성이 변화된다는 기존 연구를 바탕으로 전기간 자료(Data 1)와 변화시점이후의 강우특성을 보존하는 모의강우(Data 2)를 사용하여 유출량 및 오염부하량의 발생에 대한 비교를 실시하여 도시유출에 관련하여 유출수 및 CSOs 관련 시설의 용량 산정에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

* 정회원·고려대학교 환경시스템공학 석사과정·E-mail : fbtjdn@korea.ac.kr

** 정회원·한밭대학교 토목공학과 전임강사·E-mail : hwandonjun@gmail.com

*** 정회원·고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정·E-mail : rk11010@korea.ac.kr

**** 정회원·고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정·E-mail : stynerz@naver.com

***** 정회원·고려대학교 건축·사회환경공학과 교수·E-mail : jaykim@korea.ac.kr

2. 방법론

강우-유출 분석을 위해서는 일정량 이상의 충분한 자료를 필요로 하게 된다. 국내의 경우 30년 이상 시강우자료가 축적된 관측소가 다수 존재하며, 일반적으로는 자료의 활용에 큰 문제가 없다고 할 수 있다. 그러나 앞서 서론에서 설명한 바와 같이 강우특성이 변화하고 있다는 사실에서 살펴본다면 현재 구축된 자료를 모두 활용한다는 것은 현재 강우-유출에 대해 다소 왜곡된 결과를 가질 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 특성변화가 진행되었다고 판단되는 시점 이후의 자료만을 활용하고자 한다면 통계분석을 위한 자료의 수가 부족하게 된다. 이를 보완하기 위하여 본 연구에서는 강우모형을 활용하여 충분한 강우자료를 발생시켜 대표적인 도시유역 유출모형인 SWMM을 이용하여 유출량 및 CSOs 발생량을 산정하였다.

2.1 강우모형

강우 모형은 활용가능한 강우자료가 제한적이거나 가뭄분석 등 장기간의 자료가 필요할 경우 유용하게 사용할 수 있는 강우 모의 기법이다. 강우모형의 종류는 매우 다양하다. 본 연구에서는 점강우에 대한 재현성이 우수하고 모의과정이 비교적 간단한 NSRPM(Neyman-Scott Rectangular pulses Poisson process Model)을 이용하여 강우를 모의하였다. Rodriguez-Iturbe et al.(1987)에 의해 제안된 Neyman-Scott 모형은 Neyman-Scott 점과정에 따라 모의강우를 발생시키는 모형으로, 강우발생 및 특성에 관련된 λ , β , η , μ_c , μ_x 등 5개의 매개변수를 가지며 아래 식(1)~(3)과 같은 통계특성식으로 매개변수를 추정하여 강우를 모의한다.

$$E[Y_i(\tau)] = \lambda \eta^{-1} E[c] E[x] \tau \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Var[T_i(\tau)] = & \lambda \eta^{-3} (\eta \tau - 1 + e^{-\eta \tau}) (2E[c]E[x^2] + E[c^2 - c]E^2[x] \frac{\beta^2}{\beta^2 - \eta^2}) \\ & - \lambda (\beta \tau - 1 + e^{-\beta \tau}) \frac{E[c^2 - c]}{\beta(\beta^2 - \eta^2)} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Cov[Y_i(\tau), Y_{i+k}(\tau)] = & \lambda \eta^{-3} (1 - e^{-\eta \tau})^2 e^{-\eta(k-1)\tau} (E[c]E[x^2] + \frac{1}{2} \frac{E[c^2 - c]E^2[x]\beta^2}{\beta^2 - \eta^2}) \\ & - \lambda (1 - e^{-\beta \tau})^2 e^{-\beta(k-1)\tau} \frac{1}{2} \frac{E[c^2 - c]E^2[x]}{\beta(\beta^2 - \eta^2)}, k \geq 1 \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 SWMM

SWMM(Storm Water Management Model)은 1971년 미국 EPA의 지원을 받아 Metcalf & Eddy 사가 Florida 대학 및 W.R.E(Water Resources Engineers)와의 공동 연구로 도시유역 하수 시스템 내의 유량 및 수질을 모의할 수 있도록 개발되었으며, 대표적인 도시지역의 강우유출/비점원 오염 모델로서 세계적으로 가장 널리 쓰이고 있다. 복잡한 단일 강우사상이나 연속 강우사상에서 수량분야에서 강우-유출, 침투, 표면유출, 월류, 관거내 흐름 및 흐름 추적, 수질모의 등이 가능하며, 주로 도시배수시스템의 평가와 설계에 이용된다(Huber and Dickinson(1988)).

3. 적용 및 결과

본 연구에서 유출량 및 CSOs 발생량 산정을 위해 입력되는 강우자료는 서울지방기상청의 전 기간 실측강우자료(Data 1)와 1990년 이후의 강우특성을 지닌 모의강우(Data 2)이다. 강우모의를 위하여 서울지방기상청의 1990~2006년까지의 17개년의 4월부터 10월까지의 시강우자료를 이용하여 집성시간별 통계특성을 분석하였다. 월별 집성시간별로 평균과 분산, lag-1 자기공분산, lag-1 자기상관계수, 무강우확률(P_{dry}), 연속강우확률(P_{DD}), 연속무강우확률(P_{WW})을 구하였고(Table 1), 1990년 이후 자료의 통계특성을 이용하여 모의강우 100년치를 발생시켰다.

		Mean	Var.	lag-1 Cov.	lag-1 Corr.	P_{dry}	P_{DD}	P_{WW}
4월	1hr	0.1052	0.3737	0.2335	0.6248	0.9311	0.9171	0.0550
	6hr	0.6313	7.7735	3.5009	0.4504	0.8794	0.8314	0.0735
	12hr	1.2625	22.2194	6.0213	0.2710	0.8353	0.7431	0.0745
	24hr	2.5251	53.8591	6.9593	0.1292	0.7412	0.5922	0.1118
7월	1hr	0.5453	8.0343	4.7074	0.5859	0.8345	0.7951	0.1263
	6hr	3.2716	140.8730	45.8801	0.3257	0.7120	0.6167	0.1935
	12hr	6.5433	369.4107	98.3841	0.2664	0.6186	0.4810	0.2457
	24hr	13.0865	959.2893	147.5662	0.1539	0.4782	0.3055	0.3510

Table 1. 관측자료의 월별 통계특성(1990-2006년)

모의강우의 기본적인 통계치와 평균강우량 및 강우강도 등을 바탕으로 재현성을 검토한 결과 실측자료의 특성을 잘 재현하였다. 각 강우자료에 따른 강우특성은 Table 2에 기록하였다.

자료 구분	Data 1 (1961-2006년)	Data 2		비고
		실측강우 (1990-2006년)	모의강우 (모의 100년)	
평균 강우량(mm)	1247.6	1371.3	1387.7	·
최대 강우량(mm)	2230.7	2230.7	2754.7	·
최소 강우량(mm)	661.0	929.7	382.0	·
최대 강우강도(mm/hr)	112.0	90	94	·

Table 2. 자료기간별 모의강우의 강우특성

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Evaporation (mm)	35.99	47.11	92.45	125.24	143.96	141.83	113.44	123.64	110.93	85.69	53.18	38.48

Table 3. 월평균 증발량

실측강우자료와 모의강우자료를 H 배수분구에 적용하여 유출량 및 CSOs 발생량을 산정하였다. 대상유역인 H 배수분구는 대단위 아파트 단지로 구성된 고밀도 주거지역으로 학교 운동장을 제외한 대부분의 지역이 불투수면인 전형적인 도시유역이다. 장기 유출모의를 위해서 서울지점의 월평균 증발량 값을 산정하여 입력(Table 3)하였고, 대상유역 및 SWMM의 입력에 대한 기본적인 개요사항을 Table 4에 정리하였다.

	구분	특성
	면적(km ²)	1.61
	인구(명)	59,941
	총관거연장(m)	17,024
	유역평균경사	0.00022
	소유역 분할	167 개

Table 4. 대상 유역

Data 1과 Data 2를 이용하여 장기 유출을 모의하여 산정된 유출량에 대하여 각 자료별로 구분하여 비교하였다. Data 1과 Data 2에 의한 유출에 대해 비교한 결과 Data 2(모의강우)에 의한 유출횟수는 연평균 약 20회로 Data 1에 의한 유출보다 연 2회정도 많이 발생하였으며, 연평균 총유출량 및 CSOs는 $188.2 \times 10^3 m^3$, $106.9 \times 10^3 m^3$ 크게 발생하였다.

	Data 1	Data 2	비고
연평균 유출횟수	17.96	20.75	(+)2.79
연평균 CSOs 발생 횟수	5.76	6.55	(+)0.79
연평균 총 유출량(m^3)	683.4×10^3	871.6×10^3	(+)188.2 $\times 10^3$
연평균 CSOs량(m^3)	360.5×10^3	467.4×10^3	(+)106.9 $\times 10^3$
연평균 처리장 유입량(m^3)	322.9×10^3	404.2×10^3	(+)81.3 $\times 10^3$

Table 5. 적용 강우자료별 유출 비교

유출 모의결과에 대하여 통계분석을 실시하였다. 적정 확률분포형 산정을 위하여 Anderson Corr. Test, Rum Test, Turnning Point Test 방법으로 무작위성 검정을 실시하였으며, 검정결과 자료는 무작위성을 갖는 것으로 나타났다. 또한, Moment 방법과 Maximum Likelihood 방법, Probability Weighted Moments 방법을 이용하여 매개변수를 추정하였으며, 추정결과 최종적으로 적정 확률분포형은 2변수 Gamma 분포로 선정하였다. 선정된 확률분포형으로부터 비초과확률 0.8, 0.5의 유출량을 산정하였다. Data 1을 이용하여 산정된 비초과확률 0.8의 유출량은 $1,008.1 \times 10^3 m^3$, CSOs 발생량은 $544.9 \times 10^3 m^3$ 이다. 반면 Data 2를 이용하여 산정된 비초과확률 0.8의 유출량 및 CSOs 발생량은 각각 $1,315.7 \times 10^3 m^3$, $721.8 \times 10^3 m^3$ 이었다.

통계분석 결과 '90년 이후의 강우자료만을 이용하여 발생시킨 모의강우에 의해 산정된 유출량 및 CSOs 발생량은 전기간 강우자료를 이용하여 산정한 것보다 비초과확률 0.8, 0.5에 대하여 각각 $317.6 \times 10^3 m^3$, $135.9 \times 10^3 m^3$ 크게 산정되었으며, CSOs 발생량은 $176.9 \times 10^3 m^3$, $72.3 \times 10^3 m^3$ 크게 산정되었다. 따라서 최근의 강우특성의 변화로 인하여 발생하는 유출량에 대해 처리/저류할 수 있는 시설에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

		Data 1		Data 2		비교	
		총 유출량(1)	CSOs(2)	총 유출량(3)	CSOs(4)	(3)-(1)	(4)-(2)
기초 통계	Mean	683.4×10^3	360.5×10^3	871.6×10^3	467.4×10^3	188.2×10^3	106.9×10^3
	STDV	439.6×10^3	257.4×10^3	640.7×10^3	368.7×10^3	-	-
	C_v	0.643	0.714	0.735	0.789	-	-
	C_s	0.917	1.113	1.514	1.315	-	-
	C_k	3.171	4.094	6.199	4.951	-	-
매개 변수	α	187.181	121.442	290.026	190.254	-	-
	β	2.268	1.844	1.867	1.526	-	-
비초과 확률	0.8	$1,008.1 \times 10^3$	544.9×10^3	$1,315.7 \times 10^3$	721.8×10^3	317.6×10^3	176.9×10^3
	0.5	586.1×10^3	297.9×10^3	722.0×10^3	370.2×10^3	135.9×10^3	72.3×10^3

Table 6. 유출에 대한 통계분석 결과 비교

4. 결론

최근 기후변화와 도시화에 따른 강우특성과 유출에 영향을 미친다는 연구가 진행되었고, 본 연구에서는 이러한 영향으로 도시유역에서 발생하는 유출의 변화를 정량적으로 분석하여, 도시유역에서 발생하는 CSOs의 관련 시설물의 규모를 결정하는 기준을 제시하고자 하였다. 기후변화와 도시화의 영향에 따라 강우특성이 변화가 진행되었다고 판단되는 1990년 이후의 강우자료만으로 강우모형을 사용하여 장기간의 강우자료를 생성, 이를 이용해서 유출량 및 CSOs 발생량에 대한 통계적 분석을 실시하였다. 분석결과 '90년 이후의 강우자료만을 이용하여 발생시킨 모의강우에 의해 산정된 유출량 및 CSOs 발생량은 전기간 강우자료를 이용하여 산정한 것보다 비초과확률 0.8, 0.5에 대하여 각각 $317.6 \times 10^3 \text{ m}^3$, $135.9 \times 10^3 \text{ m}^3$ 크게 산정되었으며, CSOs 발생량은 $176.9 \times 10^3 \text{ m}^3$, $72.3 \times 10^3 \text{ m}^3$ 크게 산정되었으며, 관련 시설물의 설계에 있어서 이러한 부분에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다.

감 사 의 글

본 연구는 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2007-314-D00279)입니다.

참 고 문 헌

1. Mohseni, O., and Stefan, H. G. (1998), "A monthly streamflow model", *Water Resources Research*, 34(5), pp.1287-1298.
2. Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D.R., F.R.S., and Isham, V. (1987), Some models for rainfall based of stochastic point processes, *Proc. R. Soc. Lond. A*, Vol. 410, No. 1839, pp.269-288.
3. Whetton, P. H., Fowler, A. M., Haylock, M. R., and Pittock, A. B. (1993), "Implications of climate change due to the enhanced greenhouse effect of floods and droughts in Australia", *Climatic Change*, Vol.25, pp.289-317.
4. 유철상, 김대하, 박상형, 김병수, 박창열 (2007), "서울지점 강우자료에 나타난 도시화의 간접 분석", **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 40(8), pp.629-641.