도시 우수 관망 계획 시 확률 강우의 시간 분포 방법에 관한 연구

A Temporal Distribution Method of Probable Rainfall for Planning a Storm Sewer Network in an Urban Area

박종표* · 강태욱** · 이상호***

Park, Jongpyo*, Kang, Taeuk**, and Lee, Sangho***

Abstract

Recently, rainfall runoff models have been introduced for planning a storm sewer network in an urban areas because they can calculate the flood hydrograph as well as peak flow. This would solve the flood problem for the entire watershed. While a rainfall hyetograph is an essential input to a rainfall-runoff model, there is no proper guideline for an urban area on how to obtain a rainfall hyetograph from a temporal distribution of probable rainfall. The purpose of this study is to suggest an appropriate method for temporal distribution of probable rainfall for a storm sewer network. Thus, Huff's quartile method, which is widely used in practice, and the alternating block method (ABM), which is known to be reasonable for planning medium- or small-scale drainage facilities, were compared. The two estimation results were used for the comparison: the probable rainfall amounts by duration; the peak flows from arbitrary watersheds. The results showed that the ABM was more appropriate than the Huff method from three perspectives: reproducibility of actual rainfall phenomena, accuracy of peak flow estimates for small drainage areas in urban regions, and consideration of continuity for the storm sewer network. These results may contribute to enhance planning methods for a storm sewer network in urban areas.

Key words : Temporal Distribution, Rainfall, Storm Sewer Network, ABM, Huff

요 지

최근의 도시 우수 관망 계획에는 유역 전반의 홍수 문제 해결을 위해 침투 홍수량뿐만 아니라 홍수 수문 곡선도 산정할 수 있는 강우-유출 모형이 도입되고 있다. 홍수 수문 곡선을 결정하기 위해서는 시간 분포된 확률 강우량이 강우-유출 모형에 입력되어야 하는데, 도시 우수 관망 해석에 적용할 확률 강우의 시간 분포 방법에 대한 기준이 없는 실정이다. 이에 본 연구는 도시 우수 관망 계획에 적합한 확률 강우량의 시간 분포 방법을 제시하는데 목적이 있다. 이를 위해 실무적으로 널리 이용되고 있는 Huff 방법과 중·소규모 배수 시설물의 계획에 합리적이라고 알려져 있는 alternating block method (ABM) 방법을 비교 검토하였다. 두 방법의 비교에는 지속기간별 확률 강우의 산정 결과와 다수의 임의 유역에 대한 홍수량 산정 결과가 이용되었다. 그 결과, 실제 강우 현상의 재현성, 소규모 배수 구역의 침투 홍수량 산정에 대한 정확성, 우수 관망에 대한 연속성 고려의 3가지 관점에서 ABM 방법이 Huff 방법에 비해 적절한 것으로 검토되었다. 본 연구의 결과는 합리적인 도시 우수 관망 설계 기술을 구현하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 강우, 시간 분포, 우수 관망, ABM, Huff

1. 서 론

도시 유역에서 유역 유출 모의를 통해 특정 지점의 홍수량

을 산정할 때 홍수 수문 곡선의 형태와 침투 홍수량에 영향을 주는 인자는 다양하다. 특히, 여러 인자 가운데 유역 및 관거 특성 인자와 분석된 확률 강우량을 기초로 작성된

*정회원, 주식회사 헥코리아 이사(E-mail: jppark@hecorea.co.kr)

Member, Executive Director, HECOREA

**정회원, 부경대학교 방재연구소 전임연구교수(E-mail: ktw62@hanmail.net)

Member, Research Professor, Disaster Prevention Research Institute, Pukyong National University

***교신저자, 정회원, 부경대학교 공과대학 토목공학과 교수(Tel: +82-51-629-6076, Fax: +82-51-629-6063, E-mail: peterlee@pknu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Pukyong National University

강우량의 시간 분포가 강우-유출 모의 결과에 큰 영향을 미친다. 이 중 유역 면적, 유역 경사, 불투수 지역의 면적비 등의 유역 특성 인자와 관거의 형태, 제원, 길이, 경사 등의 관거 특성 인자는 지형 정보 시스템이나 관련된 설계 기준 등을 통해 비교적 객관적으로 결정될 수 있다. 반면에, 강우의 시간 분포는 Alternating Block Method (ABM), Huff 4분위법 (Huff, 1967), Mononobe 방법, Keifer & Chu 방법(Keifer and Chu, 1957) 등이 다양하게 제시되어 있으나, 아직까지 적용 범위에 대한 명시적인 지침이 부재하다. 특히, 시간 분포 방법별로 계산되는 유출 수문 곡선의 형태 및 첨두 유량이 상이하므로 보다 합리적인 기준에 의하여 강우량의 시간 분포 방법을 선정할 필요가 있다.

한편, 우수 관망 시설에 대한 계획의 경우, 대부분 합리식과 같은 간단한 강우-유출 모형을 적용해왔기 때문에 강우의 시간 분포에 대한 고민이 필요하지 않았다. 하지만 최근에는 집중 호우로 인한 침수 피해가 많이 발생함에 따라 하수도 시설물들의 연계를 통한 침수 해결이 요구되었고, 첨두 유량 뿐만 아니라 유출 수문 곡선도 산정할 수 있는 강우-유출 모형을 설계에 도입해야 할 필요성이 제기되었다. 그러나 현재까지 하수도 시설물 설계 시 강우-유출 모형에 적합한 강우의 시간 분포 방법은 제시되지 않았다. 특히, 강우의 시간 분포 방법에 관한 이론이 거론되기 시작한 초기부터 현재까지 수십여 년 동안 최적의 시간 분포 방법 선정에 대한 논란이 제기되어 왔다. 하지만 외국의 저명한 문헌에서도 실무에서 활용할 강우의 시간 분포 방법에 관하여 원론적인 기술만 할 뿐 명확한 지침이 없다(MLTM, 2011).

강우의 시간 분포에 관한 연구로서, MOCT (2000)은 단일 호우(event rainfall)를 중심으로 우리나라 69개 강우 관측소의 실측 강우자료를 분석하여 Yen & Chow 방법(Yen and Chow, 1980) 및 Huff 방법의 지점별 시간 분포 결과와 무차원 누가 곡선을 제시하였다. 이에 우리나라에서는 2000년대 이후부터 하천 및 수공 구조물(댐, 펌프장, 저류지) 등의 계획 시 Huff 분포를 지배적으로 사용해 왔다. 그러나 Huff 방법은 호우 선정, 평균 방법, 지속기간별 동일 분포 가정 등 여러 가지 문제를 가지고 있어 극치 호우 사상을 적절히 모의하지 못하는 약점이 지적되었다(Yoon et al., 2004; Jang et al., 2006). 이와 관련하여 MLTM (2011)는 Huff 방법을 보완한 시간 분포 방법을 제안하였고, 시간 분포 방법의 적용 가이드라인을 비교적 자세히 제시하였다. 하지만 특정 시설물의 계획을 위해서 어떤 분포를 적용하는 것이 타당한지에 관한 기술은 없다.

적정 시간 분포 방법을 검토한 연구 사례들로서, MOCT (2004)은 ABM을 제외한 타 강우 분포형의 경우 분위나 첨두 강우 위치에 따라 일정 지속기간에 대한 최대 강우강도 자체가 달라져서 일관성 있는 홍수량 산정이 어려운 것으로 기술하였다. Park (2013)은 소, 중, 대규모의 댐 유역 9개를 대상으로 Huff, ABM, Mononobe 방법의 적용성을 검토하였다. 연구 결과, 유역 면적의 크기에 따라 소유역(900 km² 이하)

의 경우 ABM이 적합하고, 중유역(1,000~6,000 km² 이하)에서는 Huff 분포를 적용하는 것이 적절하며 대유역(6,000 km² 이상)의 경우 ABM, Huff, Mononobe 방법이 모두 사용 가능한 것으로 분석하였다. 그리고 Joo et al. (2007)은 유역 면적에 따른 무 강우 지속기간의 결정(interevent time definition, IETD) 방법과 3시간 이하의 강우자료를 포함한 Huff의 무차원 누가 곡선을 사용하여 도시 유역의 특성을 고려한 강우 분포 방법을 제시하였다. 또한, Choi et al. (2014)은 기존의 Huff 방법이 가지고 있는 첨두 유량 과소 산정의 문제를 보완하기 위해 극한 사상의 호우 패턴을 반영하는 시간 분포 방법을 제안한 바 있다.

한편, 도시 유역과 같이 도달시간이 짧은 소규모 유역의 경우, 강우강도에 의해서 첨두 홍수량이 결정된다(MOCT, 2000). 실제로 MOCT (2000)은 도달시간이 짧은 유역의 첨두 홍수량은 강우 체적보다는 강우의 첨두 강도에 의해 결정되고, 도달시간이 긴 유역에서는 첨두 강도와는 무관하고 강우 체적에 의해 결정되는 것으로 기술하였다. 따라서 도달시간이 짧은 도시 유역의 우수 관망에 대한 해석 시 강우강도의 정확한 분석이 중요하다.

본 연구에서는 소규모 배수 구역이 다중으로 결합된 도시 우수 관거의 계획에 적합한 강우의 시간 분포 방법에 대하여 검토하였다. 이를 위해 국내에서 하천 및 수공 구조물의 계획에 주로 사용하고 있는 Huff 방법과 중·소규모 배수 시설물의 계획에 합리적이라고 알려져 있는 ABM의 적용성을 비교 평가하여 적절한 확률 강우량의 시간 분포 방법을 제시하였다.

2. 연구의 방법

2.1 연구 절차 및 내용

도시 우수 관망의 계획 시 확률 강우량의 적정 시간 분포 방법을 결정하기 위해 문헌 조사, 대상 유역에 대한 확률 강우량 분석과 시간 분포, 시간 분포 방법별 홍수 유출 특성을 분석하였다.

먼저, 적정 강우 분포 방법 선정에 대한 문헌 조사는 MOCT (2000)과 MLTM (2011)의 연구 성과를 주로 분석하고, 이외의 여러 논문과 보고서를 검토하였다. 둘째, 강우 분석을 통해 대상 지역에 대한 확률 강우량을 산정하였고, 확률 강우량을 ABM과 Huff 방법으로 시간 분포시켰다. 그리고 시간 분포시킨 확률 강우에 대하여 지속기간별 1시간 최대 강우량을 검토하였다. 셋째, ABM, Huff 14분위 방법을 통해 구성한 시간 분포된 확률 강우량을 SWMM 모형에 입력하여 강우-유출 특성을 비교 하였다. 이 때 시간 분포 방법별, 강우 빈도(10년, 30년, 50년)별, 배수 구역 면적(0.1~1,000 ha)별로 첨두 홍수량 및 홍수 유출 특성을 검토하였다. 그리고 이를 종합하여 도시 우수 관망의 계획 시 적합한 시간 분포 방법을 제시하였다. Table 1은 상기에 서 기술한 연구 절차 및 내용을 요약 정리한 표이다.

Table 1. Research Method and Procedure

Step	Object	Contents
Step 1	Literature review	<ul style="list-style-type: none"> - 1999 Report on Water resources management techniques development (MOCT, 2000) - Improvement and complementary research for probable rainfall (MLTM, 2011) - Research on other domestic and international papers and research reports
Step 2	Application and analysis of temporal distribution of probable rainfall by methods	<ul style="list-style-type: none"> - Temporal distribution of probable rainfall by the ABM and the Huff's quartile method - Analysis of maximum rainfall amount for 1 hour by method and duration
Step 3	Analysis of characteristics for rainfall-runoff by catchment area	<ul style="list-style-type: none"> - Composition of a rainfall-runoff model by the SWMM - Estimation of peak flow with the ABM and Huff method by frequency (10-year, 30-year, 50-year), duration, and catchment area - Analysis for characteristics of flood hydrograph by methods
Step 4	Suggestion of an appropriate temporal distribution method for probable rainfall	<ul style="list-style-type: none"> - A review of temporal distribution methods for probable rainfall - Suggestion for a suitable temporal distribution method of probable rainfall to design storm sewer network in urban area

2.2 연구 대상 지역 및 확률 강우량의 분포

본 연구의 대상 유역은 삼척 지역이고, 삼척 지역의 지배 강우관측소는 기상청 관할 동해 기상 관측소이다. 연구에서는 동해 기상 관측소의 1993년부터 2013년까지 관측된 1시간 간격의 강우자료를 이용하여 재현기간별, 강우의 지속기간별 확률 강우량을 산정하였다. 그리고 분석한 결과를

Samcheok-si (2013), MLTM (2011)에서 분석한 지속기간별 확률 강우량과 비교하였다(Table 2). 그 결과, 빈도별 확률 강우량의 차이는 거의 없었고, Samcheok-si (2013)에서 산정된 강우량이 다소 큰 것으로 분석되었다.

강우의 시간 분포 방법별 적용성을 검토하기 위해 확률 강우량을 시간 분포하였다. 즉, ABM 및 Huff 14분위 방법으

Table 2. Frequency-duration-rainfall

(unit: mm)

Return period (year)	Classification	Duration (minute)								
		60	120	180	360	540	720	900	1080	1440
10 year	①	55.0	82.6	101.7	137.1	157.4	182.3	207.9	235.0	273.7
	②	49.6	83.0	107.4	142.3	166.3	194.1	221.8	250.7	289.4
	③	50.8	78.8	99.3	141.0	170.1	193.2	214.5	232.2	266.4
20 year	①	63.3	96.3	118.8	160.0	182.4	211.2	240.8	273.2	319.5
	②	57.4	97.3	126.1	166.1	192.8	225.0	257.7	292.7	339.0
	③	59.0	92.2	116.1	163.8	197.1	224.4	247.5	270.0	309.6
30 year	①	68.2	104.3	128.7	173.1	196.8	227.9	259.8	295.1	345.8
	②	61.8	105.5	136.9	179.7	208.0	242.7	278.3	316.9	367.6
	③	63.7	99.8	126.0	177.6	212.4	242.4	267.0	291.6	333.6
50 year	①	74.2	114.2	141.0	189.6	214.9	248.6	283.5	322.6	378.8
	②	67.4	115.8	150.3	196.8	227.1	264.9	304.1	347.1	403.3
	③	69.5	109.4	138.0	193.8	232.2	264.0	292.5	316.8	362.4
80 year	①	79.6	123.4	152.3	204.7	231.3	267.7	305.1	347.7	409.0
	②	72.5	125.2	162.7	212.4	244.5	285.2	327.7	374.7	436.0
	③	74.8	118.2	149.1	209.4	250.2	284.4	315.0	342.0	391.2
100 year	①	82.2	127.6	157.7	211.8	239.1	276.7	315.4	359.7	423.3
	②	74.9	129.6	168.5	219.8	252.8	294.8	338.9	387.8	451.4
	③	77.4	122.4	154.5	216.6	258.3	294.0	325.5	352.8	403.2

① This study

② Samcheok-si (2013)

③ MLTM (2011)

로 확률 강우량을 시간 분포하였다. 확률 강우량의 시간 분포는 3개의 재현기간(10년, 30년, 50년 빈도)과 8개의 지속기간(30분, 1시간, 2시간, 3시간, 6시간, 9시간, 12시간, 24시간)을 조합하여 작성되었다. Fig. 1은 예로서, 동해 기상 관측소의 30년 빈도 확률 강우량을 ABM 및 Huff 1~4 분위 방법으로 지속기간 6시간에 대하여 시간 분포시킨 그림이다. 이 때 확률 강우량의 시간 분포는 5분 단위로 하였다.

2.3 홍수량 산정 방법

본 연구에서는 도시 우수 관망의 계획에 적합한 시간 분포 방법을 제시하기 위해 시간 분포 방법에 따른 침투 홍수량과 홍수 유출 특성을 검토하였다. 이에 연구에서는 홍수량 산정 방법으로 도시 유역의 홍수 유출 해석에 적합한 SWMM (storm water management model)의 Runoff 모듈을 이용하였다. Runoff 모듈의 지표면 유출에 대한 추적식

(routing equation)은 마찰 경사를 유역 경사와 같다고 가정한 Manning 식과 저류량의 변화율을 유입량과 유출량으로 나타낸 연속 방정식으로 구성된 비선형 저류 방정식(nonlinear reservoir equation)을 사용한다.

한편, 확률 강우량에 대한 시간 분포 방법의 적정성을 검토 하기 위해서는 단일한 유역에 대한 적용만으로 결과를 도출하기 어렵다. 또한, MLTM (2011)는 시간 분포 방법에 대한 보다 정밀한 평가를 위해 유출 해석에 의한 민감도 분석이 수반되어야 함을 기술하였다. 이에 본 연구에서는 유역의 규모를 다양화하기 위해 13개의 임의의 유역을 구성하였고, 각각의 유역에 대하여 확률 강우량의 시간 분포 방법을 적용한 후 홍수량을 검토하였다. 즉, 임의로 구성한 13개 유역에 대하여 홍수량 산정의 민감도를 분석하였고, 그 결과를 바탕으로 적합한 확률 강우량의 시간 분포 방법을 제시하였다.

Table 3은 유역 면적에 따른 SWMM의 주요 유역 매개변수

(a) ABM

(b) Huff's quartile distribution method

Fig. 1. Hyetographs of 30-year Frequency Probable Rainfall with 6-hour Duration by Method

Table 3. Major Parameters for the SWMM by Catchment Area

Area (ha)	Width (m)	Impervious area (%)	Slope (m/m)	Roughness coefficient		Depression storage (mm)		Horton equation		
				Impervious	pervious	Impervious	pervious	Maximum infiltration rate (mm/hr)	Minimum infiltration rate (mm/hr)	Decay constant (1/hr)
0.1	15.81	65	0.01	0.014	0.03	6.73	22.23	75.0	3.0	2.0
0.5	35.36	65	0.01	0.014	0.03	6.73	22.23	75.0	3.0	2.0
1.0	50.00	65	0.01	0.014	0.03	6.73	22.23	75.0	3.0	2.0
5.0	111.80	65	0.01	0.014	0.03	6.73	22.23	75.0	3.0	2.0
10.0	158.11	65	0.01	0.014	0.03	6.73	22.23	75.0	3.0	2.0
30.0	273.86	65	0.01	0.014	0.03	6.73	22.23	75.0	3.0	2.0
50.0	353.55	65	0.01	0.014	0.03	6.73	22.23	75.0	3.0	2.0
80.0	447.21	65	0.01	0.014	0.03	6.73	22.23	75.0	3.0	2.0
100.0	500.00	65	0.01	0.014	0.03	6.73	22.23	75.0	3.0	2.0
150.0	612.37	65	0.01	0.014	0.03	6.73	22.23	75.0	3.0	2.0
300.0	866.03	65	0.01	0.014	0.03	6.73	22.23	75.0	3.0	2.0
500.0	1,118.03	65	0.01	0.014	0.03	6.73	22.23	75.0	3.0	2.0
1,000.0	1,581.14	65	0.01	0.014	0.03	6.73	22.23	75.0	3.0	2.0

와 입력자료를 구성한 표이다. 본 연구에서 구성한 13개 유역의 면적은 실제 도시 유역의 규모를 감안하여 각각 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 30, 50, 80, 100, 150, 300, 500, 1,000 ha로 하였다.

3. 연구 내용

3.1 강우의 시간 분포 방법별 강우 특성 분석

강우의 시간 분포 방법별 특징과 적용성을 검토하고자 대상 유역의 확률 강우강도식 산정 결과를 기초로 확률 강우량을 지속기간별로 시간 분포하였다. 그리고 Table 4와 같이 지속기간별로 1시간 최대 확률 강우량을 분석하였다.

Table 4에서 ABM에 의한 1시간 최대 확률 강우량은 지속기간별로 동일함을 알 수 있다. ABM은 확률 강우강도식에 의해 계산된 최대 강우량을 특정 지속기간의 중앙에 배치하고, 후 순위의 강우량을 최대 강우량의 오른쪽과 왼쪽에 번갈아 가며 순차적으로 배치하는 시간 분포 방법이다. 이때 최대 강우량을 비롯한 모든 강우량 값은 24시간 지속기간에 대한 고정된 값이고, 분포시키고자 하는 지속기간에 따라 해당 강우량의 위치가 변할 뿐 값의 변화는 없기 때문에 ABM에 의한 1시간 최대 확률 강우량은 지속기간별로 동일

한 것이다. 반면에 Huff 방법에 의한 지속기간별 1시간 최대 확률 강우량은 지속기간의 증가에 따라 작아지는 경향을 보였다. ABM과 달리 Huff 방법은 강우강도식에 의해 지속기간별로 결정된 확률 강우량을 무차원 시간과 무차원 강우량의 관계를 이용하여 분포시킨다. 이러한 경우, 강우강도-지속기간-빈도(intensity-duration-frequency; IDF) 관계에 의해 지속기간이 길어짐에 따라 강우강도는 감소하게 되고, 유사하게 1시간 최대 확률 강우량도 감소한 것이다.

그런데 Table 4의 Huff 방법에 의한 결과를 보면, 모든 빈도(10년, 30년, 50년)에서 지속기간 2시간과 3시간의 1시간 최대 강우량이 지속기간 1시간의 1시간 최대 강우량보다 더 큰 경우가 발생하였다. 예로서 10년 빈도 Huff 1분위의 경우, 지속기간 1시간에 대한 1시간 최대 강우량은 55.28 mm이나, 지속기간 2시간과 3시간의 1시간 최대 강우량은 각각 61.77 mm, 60.74 mm로 지속기간 1시간의 1시간 최대 강우량보다 더 크게 산정되었다. 즉, Huff 분포에서는 지속기간별 1시간 최대 강우량의 역전 현상이 나타났다. 우리나라의 경우, 지역별로 Huff 분포의 형태가 다르므로 이러한 지속기간별 1시간 최대 강우량의 역전 현상이 모든 관측소 지점에서 나타난 것은 아니다. 실제로 여러 관측소의 강우자료를 이용하여 분석한 결과, 이러한 현상이 나타나지 않는

Table 4. Maximum Rainfall Amount for 1 Hour by Method and Duration

Return period	Duration (hour)	Maximum rainfall for 1 hour				
		ABM	Huff			
			1st quartile	2nd quartile	3rd quartile	4th quartile
10 year	1	55.28	55.28	55.28	55.28	55.28
	2		61.77	62.66	62.65	57.59
	3		60.74	59.01	60.15	54.16
	6		49.47	45.07	46.57	43.63
	9		40.86	36.71	38.04	36.06
	12		35.13	31.40	32.58	31.04
	24		23.76	21.13	21.95	21.01
30 year	1	68.63	68.63	68.63	68.63	68.63
	2		77.76	78.87	78.85	72.49
	3		76.79	74.60	76.03	68.47
	6		62.61	57.05	58.94	55.22
	9		51.58	46.34	48.02	45.52
	12		44.22	39.52	41.00	39.06
	24		29.60	26.32	27.33	26.16
50 year	1	74.72	74.72	74.72	74.72	74.72
	2		85.01	86.24	86.22	79.25
	3		84.07	81.68	83.25	74.97
	6		68.58	62.48	64.56	60.49
	9		56.46	50.72	52.56	49.83
	12		48.36	43.22	44.84	42.72
	24		32.26	28.69	29.80	28.52

지점도 나타났다. 하지만 MLTM (2011)에 의하면, Huff 방법의 경우 2시간 이하의 지속기간을 가지는 강우 사상을 분석에서 제외하였고, 이에 따라 그 이하의 지속기간에 대한 분석 결과에 불확실성이 크다. 따라서 Huff 방법의 지속기간 별 최대 강우량의 역전 현상은 이러한 불확실성에 의해 나타난 결과로 판단된다.

서론에서 기술한 바와 같이 도시 구역과 같이 도달시간이 짧은 소규모 구역의 경우, 강우강도에 의해서 침투 홍수량이 결정된다(MOCT, 2000). 따라서 지속기간 1시간의 확률 강우량과 비교하여 지속기간 2시간의 1시간 최대 강우량이 크다는 것은 실제의 설계 강우강도보다 큰 값으로 구역의 홍수량을 계산하게 되는 오류를 범할 수 있다. 이런 이유로 중·소규모의 구역에 Huff 방법을 적용할 경우 설계 강우강도를 초과하는 강우량을 이용하여 시설물을 계획할 우려가 있다.

3.2 구역 면적에 따른 홍수량 분석

본 연구에서는 구역 면적이 0.1 ha~1,000 ha 범위의 총 13개 경우에 대하여 ABM과 Huff 방법을 적용하여 홍수량 산정 결과를 분석하였다(Table 5). 우선, ABM과 Huff 방법에 의해 유도된 확률 강우의 강우주상도(hyctograph)를 이용하여 10년, 30년, 50년 빈도의 침투 홍수량을 구역 면적별로 분석하였다. 각각의 빈도별 침투 홍수량은 확률 강우의 지속기간을 30분부터 24시간까지 분석한 후, 임계 지속기간을 결정하여 산정된 최대의 침투 홍수량이다.

구역 면적에 따른 10년 빈도 홍수 시 ABM에 의해 결정된 침투 홍수량과 Huff 1~4분위 중 최대치와의 차이를 검토한 결과, 구역 면적이 0.1~10 ha인 인 경우에 ABM에 의한 침투 홍수량이 Huff 방법에 비해 4.32%~11.76% 작게 산정되었다. 30 ha 이상의 구역 규모에서는 ABM에 의한 침투 홍수량이 Huff 방법에 다소 크게 산정되었고, 구역 면적인 1,000 ha인 경우에는 ABM 방법에 의한 침투 홍수량이 Huff 방법에 의한 침투 홍수량보다 6.92% 큰 것으로 분석되었다. ABM과 Huff 방법에 의한 침투 홍수량 산정 결과의 차이를 보면, 전체적으로 -11.76~6.92%로 침투 홍수량의 차이는 크지 않았다. 30년 빈도와 50년 빈도에의 결과도 10년 빈도와 유사하였지만, 빈도가 커질수록 규모가 작은 구역에 대한 홍수량의 차이가 커지고, 규모가 큰 구역에 대한 홍수량의 차이는 작아지는 것으로 분석되었다.

통상적으로 ABM은 홍수량을 크게 산정하여 안전성 면에서 높은 빈도를 요구하는 구조물의 설계에 적용하는 것이 적절한 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구에서 산정된 홍수량은 Huff 방법을 이용할 경우 300 ha 이하의 구역 규모에 대하여 30년 빈도와 50년 빈도에서 ABM보다 크게 산정되었다. 따라서 치수 안전성 면에서 하수도 시설 계획 시 Huff 방법에 의한 홍수량 산정 결과를 사용해야 하는 것으로 판단할 수 있다. 이와 관련하여 MLTM (2011)는

Huff의 무차원 누가 곡선 개발 시, 지속기간이 긴 강우 사상이 많은 우리나라의 특징을 고려하여 강우의 지속기간을 4시간 단위로 구분하여 지속기간별 상대 빈도 곡선을 작성한 것으로 기술하였다. 또한, Huff 방법은 지속기간을 4개의 구간으로 나누기 때문에 2시간 이하의 지속기간을 가지는 강우 사상은 분석에서 제외하였음을 명시하였다. 도시 우수 관망의 경우, 도달시간이 2시간 이하인 소 배수 구역의 지선 관거가 결합된 형태로 구성되어 있기 때문에, 2시간 이하의 지속기간에 대한 확률 강우량의 시간 분포를 활용해야 할 경우가 대부분이다. 즉, 지속기간 2시간 이하의 확률 강우량을 제외하여 개발된 Huff 방법을 도시 우수 관망의 계획에 적용하는 것은 적절하지 않을 것으로 판단된다. 실제로 이러한 문제를 개선하기 위해 Joo et al. (2007)은 3시간 이하의 강우를 포함하여 무차원 누가 우량 곡선을 제시하였다.

3.3 지속기간에 따른 홍수량 분석

본 연구에서는 지속기간의 개념을 고려하여 빈도별 홍수 산정에 관한 ABM과 Huff 방법의 적용성을 검토하였다. Figs. 2 and 3은 30년 빈도 홍수 시, ABM과 Huff 방법에 의한 구역 면적별, 지속기간별 침투 홍수량과 침투 홍수량 대비 특정 시간의 홍수량의 비(무차원)를 도시한 그림이다.

ABM을 적용하는 경우, 모든 규모의 구역에서 지속기간이 길어짐에 따라 침투 홍수량이 증가하다가 특정한 값으로 수렴되는 것을 볼 수 있다(Fig. 2). 즉, ABM을 적용하게 되면, 침투 홍수량이 더 이상 증가하지 않는 특정한 지속기간이 발생하게 된다. ABM의 침투 홍수량은 지속기간 24시간에서 대부분 수렴하였고, 이러한 연구 결과는 Park et al. (2012)의 연구와 유사한 결과이다.

한편, Huff 방법을 적용할 경우, 지속기간이 증가함에 따라 홍수량이 증가하였다가 다시 감소하는데(Fig. 3), 이때 최대의 침투 홍수량을 발생시키는 강우의 지속기간이 임계 지속기간에 해당된다. 또한, 구역 면적이 커짐에 따라 임계 지속기간이 길어졌다. 즉, 30년 빈도 홍수의 경우 구역 면적 0.1~0.5 ha에서는 임계 지속기간이 30분으로 나타났고, 1~30 ha에서는 1시간, 40~300 ha에서는 2시간, 500~1,000 ha에서는 3시간인 것으로 분석되었다.

3.4 결과 고찰

도시 우수 관망의 계획이라는 목적을 고려하여 확률 강우량의 적정 시간 분포 방법을 선택하기 위한 고려사항은 다음과 같은 3가지로 요약될 수 있다.

- ① 강우의 시간 분포가 실제 강우 현상을 반영하는가?
- ② 소규모 배수 구역에 대한 침투 홍수량의 산정 결과가 적절한가?
- ③ 소규모 배수 구역의 연속성을 고려하여 계획(상류, 중류, 하류 전체의 우수 흐름을 고려하여 계획)되는가?

Table 5. Comparison of Peak Flow Using Hyetograph for Temporal Distribution of Probable Rainfall Determined by ABM and Huff Method

10-year return period							
Catchment area (ha)	ABM (①)	Huff					Difference $\left(\frac{①-②}{(①+②)/2} \times 100\%\right)$
		1st quartile	2nd quartile	3rd quartile	4th quartile	Maximum (②)	
0.1	0.072	0.062	0.067	0.081	0.069	0.081	-11.76
0.5	0.250	0.208	0.227	0.260	0.245	0.260	-3.92
1.0	0.430	0.353	0.387	0.453	0.436	0.453	-5.21
5.0	1.549	1.208	1.366	1.643	1.659	1.659	-6.86
10	2.784	2.132	2.332	2.818	2.907	2.907	-4.32
30	7.070	5.131	5.812	6.745	6.824	6.824	3.54
50	10.839	7.705	8.818	10.436	10.305	10.436	3.79
80	16.003	11.317	12.883	15.434	15.421	15.434	3.62
100	19.232	13.548	15.382	18.494	18.607	18.607	3.30
150	26.899	18.746	21.337	25.508	26.000	26.000	3.40
300	47.993	32.316	37.584	44.744	45.106	45.106	6.20
500	73.046	48.478	56.378	67.801	68.504	68.504	6.42
1,000	128.639	85.496	96.060	117.133	120.035	120.035	6.92
30-year return period							
Catchment area	ABM (①)	Huff					Difference $\left(\frac{①-②}{(①+②)/2} \times 100\%\right)$
		1st quartile	2nd quartile	3rd quartile	4th quartile	Maximum (②)	
0.1	0.086	0.086	0.091	0.108	0.093	0.108	-22.68
0.5	0.302	0.296	0.313	0.361	0.320	0.361	-17.80
1.0	0.522	0.505	0.544	0.612	0.572	0.612	-15.87
5.0	1.913	1.688	1.889	2.253	2.219	2.253	-16.32
10	3.457	2.972	3.287	3.889	3.943	3.943	-13.14
30	8.884	7.195	7.971	9.247	9.500	9.500	-6.70
50	13.710	10.803	12.168	14.082	14.037	14.082	-2.68
80	20.374	15.734	17.893	20.993	20.647	20.993	-2.99
100	24.563	18.913	21.444	25.326	25.043	25.326	-3.06
150	34.529	26.248	29.589	35.327	35.355	35.355	-2.36
300	62.209	45.536	52.074	61.336	62.459	62.459	-0.40
500	95.414	67.804	78.746	93.408	93.250	93.408	2.12
1,000	170.041	118.376	135.708	163.216	165.477	165.477	2.72
50-year return period							
Catchment area	ABM (①)	Huff					Difference $\left(\frac{①-②}{(①+②)/2} \times 100\%\right)$
		1st quartile	2nd quartile	3rd quartile	4th quartile	Maximum (②)	
0.1	0.093	0.101	0.101	0.120	0.108	0.120	-25.35
0.5	0.328	0.336	0.351	0.408	0.356	0.408	-21.74
1.0	0.568	0.577	0.613	0.688	0.635	0.688	-19.11
5.0	2.089	1.910	2.141	2.530	2.474	2.530	-19.10
10	3.778	3.364	3.723	4.399	4.415	4.415	-15.55
30	9.741	8.175	8.961	10.507	10.737	10.737	-9.73
50	15.064	12.293	13.757	15.758	15.944	15.944	-5.68
80	22.431	17.842	20.201	23.557	23.020	23.557	-4.90
100	27.070	21.411	24.265	28.439	27.969	28.439	-4.93
150	38.102	29.812	33.630	39.849	39.622	39.849	-4.48
300	68.815	51.871	58.810	69.512	70.475	70.475	-2.38
500	105.833	77.362	89.283	105.131	105.786	105.786	0.04
1,000	189.136	133.857	154.567	184.802	186.547	186.547	1.38

(a) Peak flow by duration

(b) Ratio of flow over peak flow (dimensionless) by duration

Fig. 2. Variation of Peak Flow by Duration (ABM, 30-year return period)

(a) Peak flow by duration

(b) Ratio of flow over peak flow (dimensionless) by duration

Fig. 3. Variation of Peak Flow by Duration (Huff, 30-year return period)

MLTM (2011)에 의하면, 시간 최대 강우량의 발생 분위는 지속기간에 큰 차이를 보이지 않고 대부분 40~50% 사이에 위치하므로, 중앙 집중이나 ABM의 시간 배치 형태와 부합하는 결과를 보여주고 있음을 설명하였다. 따라서 ① 문항에 대한 해답으로서 강우의 실제 시간 분포 특성을 반영하기 위해서는 ABM을 적용하는 것이 적절하다고 판단할 수 있다. ② 문항의 경우는 3.1절과 3.2절의 연구 성과를 종합하여 보면 대략적인 해답을 얻을 수 있다. 소규모 배수 구역의 첨두 홍수량은 강우강도에 영향을 크게 받는다. Huff 방법에서는 지속기간별 1시간 최대 강우량의 역전 현상이 나타났고, 이에 따라 과다한 확률 강우량으로 홍수량을 계산할 우려가 있는 것으로 분석되었다. 또한, Huff 방법의 경우 시간 단위 자료를 이용하여 유도되었으므로, 강우의 시간 간격을 시간 단위 이하로 설정하여 외삽하는 경우에는 산정 결과의 불확실성이 커질 수 있으므로 확률 강우강도를 잘 반영할 수 있는 ABM의 적용이 합리적일 것이다. ③ 문항은 도시 우수 관망의 계획 시 매우 중요한 항목이 될 수 있다. 즉, 하천이나 댐 구조물과 같은 대규모 시설의 계획에는 목표하고자 하는 지점의 홍수량 산정만이 목적이다. 하지만 하수도 시설은 소 배수 구역의 지선 관거와 다수의 지선 관거 간 결합에 의해 형성되는 간선 관거를 동시에 고려해야 하므로 동일 지속기간의 확률 강우량에 대한 시간 분포를 적용하는 것이 합리적이다. 본 연구의 3.3절에서 제시한 연구 성과와 같이 Huff 방법의 경우 배수 면적별로 홍수량이 최대가 되는 임계 지속기간이 다르게 산정되나, ABM의 24시간 분포를 이용할 경우 지속기간의 증가에 따라 홍수량이 수렴하는 것으로 검토되었다. 즉, ABM의 24시간 시간 분포를 적용할 경우, 도시 우수 관망의 연속성을 고려한 안정적인 계획이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 ABM과 Huff 방법을 중심으로 소 배수 구역이 다중으로 결합된 도시 유역의 우수 관거 계획에 적합한 강우의 시간 분포 방법을 검토하였다. 이를 위해 동해 기상 관측소의 관측 강우자료를 이용하여 강우-빈도 해석을 수행하였고, 다양한 유역 규모에 대한 적용을 위해 임의의 13개 유역을 대상으로 SWMM을 이용하여 홍수량을 분석하였다.

도시 유역의 우수 관망 계획에 적합한 확률 강우의 시간 분포 방법을 결정하기 위해 실제 강우 현상의 재현성, 소규모 배수 구역에 대한 첨두 홍수량 산정의 정확성, 우수 관망의 연속성을 고려한 계획의 3가지 관점에 대하여 검토하였다. 우선, 실제 강우 현상의 재현에 있어서 실제의 시간 최대 강우량의 발생 분위가 대부분 강우의 지속기간 중 40~50% 사이에 위치하는 것을 감안할 때, ABM의 시간 분포 형태와 유사한 것으로 검토되었다. 두 번째 첨두 홍수량 산정의

정확성 면에서는 시간 단위 자료를 이용하여 유도되어 시간 단위 이하의 지속기간에 대한 확률 강우량 산정에 불확실성이 큰 Huff 방법보다는 ABM에 의한 시간 분포 방법이 보다 적절한 것으로 분석되었다. 세 번째로 우수 관망의 연속성을 고려한 계획에서는 소규모 배수 구역 내에 존재하는 다수의 관거를 동시에 고려해야 하는 도시 우수 관망의 특성 상, 동일 지속기간의 확률 강우량에 대한 시간 분포를 적용하는 것이 합리적이다. 이에 배수 면적별로 임계 지속기간이 상이한 Huff 방법보다는 홍수량이 수렴하는 ABM의 24시간 시간 분포를 이용하는 것이 적용에 유리한 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 국내의 도시 우수 관망 설계 및 해석에 확실히 사용되고 있는 Huff 방법의 문제점을 제시하고, ABM의 적용 가능성을 제시하였다. 향후, 관련된 연구를 지속하여 보다 합리적인 도시 우수 관망 계획 기술을 구현하는데 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2017년)에 의하여 연구되었으며, 이에 심심한 감사를 드립니다.

References

- Choi, S., Joo, K., Shin, H., and Heo, J.H. (2014). Improvement of Huff's method considering severe rainstorm events. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 11, pp. 985-996.
- Huff, F.A. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 1007-1019.
- Jang, S.H., Yoon, J.Y., and Yoon, Y.N. (2006). A study on the improvement of Huff's method in Korea: I. Review of applicability of Huff's method in Korea. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 9, pp. 767-777.
- Joo, J.G., Lee, J.H., Jo, D.J., Jun, H.D., and Kim, J.H. (2007). Development of a rainfall time distribution model for urban watersheds. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 8, pp. 655-663.
- Keifer, C.J., and Chu, H.H. (1957). Synthetic storm patterns for drainage design. *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 83, No. HY4, pp. 1-25.
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT). (2000). *1999 Report on water resources management techniques development: Design rainfall temporal distribution of regional*.

Ministry of Construction and Transportation (MOCT). (2004). *Study on the characteristics of urban rainfall and establishment of the rainfall observation system on the ground*. Sejong University and Kumoh National Institute of Technology.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2011). *Improvement and complementary research for probable rainfall*.

Park, C., Yoo, C., and Jun, C.H. (2012). Bivariate rainfall frequency analysis and rainfall-runoff analysis for independent rainfall events. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 7, pp. 713-727.

Park, D.H. (2013). *Evaluation of the time distributions for design rainfall*. Master's thesis, Seokyeong University.

Samcheok-si. (2013). *Master plan for improvement of sewerage system*.

Yen, B.C., and Chow, V.T. (1980). Design hyetographs for small drainage structures. *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 106, No. HY 6, pp. 1055-1076.

Yoon, Y.N., Jang, S.H., Kang, S.K., and Park, M.S. (2004). Development of rainfall distribution for design floods. *Proceedings of the 2004 Annual Conference*, Korea Water Resources Association, pp. 313-317.

Received	January 3, 2019
Revised	January 3, 2019
Accepted	January 15, 2019