

독립 호우사상에 대한 이변량 강우빈도해석 및 강우-유출해석

Bivariate Rainfall Frequency Analysis and Rainfall-runoff Analysis for Independent Rainfall Events

박철순* / 유철상** / 전창현***

Park, Cheolsoon / Yoo, Chulsang / Jun, Chang Hyun

Abstract

In this study, the bivariate frequency analysis of the independent annual rainfall event series was done to be used for the runoff analysis, whose results were also compared with those from the conventional univariate frequency analysis. This study was applied to three differently-sized basins such as the Joongryang Stream, Chunggye Stream, and Ooyi Stream. The Clark model was used as the runoff model, and the SCS method was applied for the calculation of the effective rainfall. The alternating block method and the Huff method were considered to be compared for the temporal distribution of rainfall event. Summarizing the results are as follows. (1) The difference between the univariate and bivariate frequency analysis results were large when the rainfall duration was short, but significantly decreased as the rainfall duration increased. The univariate frequency analysis results were bigger when the rainfall duration was short, but smaller in opposite case. (2) The peak flow derived by applying the alternating block method was bigger than that by the Huff method. Also, the peak flow when applying the alternating block method increased as the rainfall duration increased, but converged smoothly around the rainfall duration of 24 hours. (3) For the Joongryang Stream, when applying the Huff method, the peak flow derived for the bivariate frequency analysis was bigger than that for the univariate case, but for the other two basins, the results were opposite. When applying the alternating block method, the results were consistent for all three basins that the peak flow derived by applying the bivariate frequency analysis was bigger than those by the univariate frequency analysis.

Keywords : independent rainfall events, bivariate frequency analysis, runoff analysis, flood discharge

요 지

본 연구에서는 독립 호우사상을 이용하여 이변량 빈도해석 및 유출해석을 수행하고, 이를 기존 단변량 빈도해석 결과와 비교·평가하였다. 본 연구는 규모가 다른 중랑천, 청계천, 우이천 유역 등 세 유역에 대해 수행되었다. 유출모형으로 Clark 모형을 이용하였고, 유효우량은 SCS 방법을 적용하여 계산하였다. 강우의 시간분포 모형으로 교호블록 방법 및 Huff 방법을 적용하여 그 결과가 비교될 수 있도록 하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다. (1) 연최대치 독립 호우사상계열의 이변량 빈도해석 결과, 지속기간이 짧은 경우에는 단변량 빈도해석 결과와의 차이가 매우 크나 지속기간이 길어짐에 따라서 그 차이가 현저히 줄어드는 것으로 나타났다. 아울러 지속기간이 짧은 경우, 단변량 빈도해석 결과가 이변량 빈도해석

* 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 석사 (e-mail: impromn@empal.com)

Master., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

** 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 교수 (e-mail: envchul@korea.ac.kr)

Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

*** 교신저자, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 박사과정 (e-mail: luckys286@naver.com)

Corresponding Author, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

결과보다 더욱 크게 나타났으나 특정 지속기간 이상부터 그 결과가 역전되는 것으로 나타났다. (2) 교호블록 시간분포 방법을 적용하는 경우가 Huff 방법을 적용한 경우보다 더욱 큰 침투유출량을 발생시키는 것으로 나타났다. 아울러 교호블록 방법을 적용하는 경우에는 강우 지속기간의 증가에 따라서 침투유출량이 점차 증가하는 것으로 나타났으나, 강우 지속기간이 대략 24시간 정도 되었을 때 그 값이 거의 수렴하는 것으로 나타났다. (3) 중랑천 유역에 대해 Huff 방법을 적용하여 유출해석을 수행한 결과에서는 이변량 설계강우를 적용한 경우가 단변량 설계강우를 적용한 경우보다 더욱 큰 홍수량을 발생시키는 것으로 나타났다. 반면에 청계천 및 우이천 유역의 경우에는 이변량 설계강우를 적용한 경우보다 단변량 설계강우를 적용한 경우의 홍수량이 다소 큰 것으로 나타났다. 그러나 교호블록 방법을 적용한 경우에는 모든 유역에 대해 이변량 설계강우를 적용한 경우가 단변량 설계강우를 적용한 경우보다 큰 홍수량을 발생시키는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 독립 호우사상, 이변량 빈도해석, 유출해석, 홍수량

1. 서론

설계홍수량의 결정 방법으로는 연 최대치 홍수량 기록을 기초로 하는 홍수량 기준방법(flow-based method)과, 강우-유출 관계 모형(rainfall-runoff model)을 이용하는 강수량 기준방법(precipitation-based method)이 있다(윤용남, 2009). 현재 국내의 경우에는 다년간의 연 최대치 홍수량 기록을 보유하고 있는 수위관측소의 수가 매우 제한적이기 때문에(국토해양부, 2010), 대부분 연 최대치 강우 계열의 빈도분석을 통해 결정된 확률강우량을 강우-유출 모형에 입력하고, 이를 분석하여 설계홍수량을 결정하고 있다.

그러나 국토해양부(2010)에서 제시한 바와 같이 강우-유출 관계 모형을 통해 설계홍수량을 결정하는 과정은 실제로 여러 문제점을 갖고 있다. 그 중 하나가 대상 유역에 대한 설계강우 지속기간의 결정 문제이다. 현재 국내에서는 임계지속기간의 개념을 도입하여 홍수량을 또는 저수지의 수위를 최대로 하는 지속기간을 설계강우 지속기간으로 결정하고 있다(정종호와 윤용남, 2009). 그러나 이러한 방법은 실제 자연적으로 발생된 강우의 시간분포를 고려했을 때 비현실적인 설계 호우사상을 만들게 되는 문제가 발생할 가능성이 있다. 예를 들어, 현재와 같은 방법을 적용하면, 도시유역과 같이 유역면적이 비교적 작은 경우에 고려하게 되는 설계강우 지속기간은 유역면적이 큰 경우에 비해서 매우 짧아지게 된다(양희성, 2003; 이정식 등, 2008). 이 경우, 몇 분 또는 최대 몇 시간의 짧은 강우 지속기간이 자연적인 호우사상의 분포 특성을 적절히 반영하지 못할 가능성이 커지게 됨은 당연하다. 실제로 많은 연구들에서도 이와 같은 기존 방법의 문제점이 계속해서 언급되고 있다(Levy and McCuen, 1999; Kao and Govindaraju, 2007; Lee et al., 2010).

좀 더 구체적으로 살펴보면, 현재와 같이 짧은 도달시간 또는 집중시간을 강우 지속기간으로 고려하여 설계 호우사상을 결정하게 되면 실제로 발생 가능한 호우사상이 아닌 가상의 호우사상을 고려하게 될 가능성을 포함하게 되는 것이다. 특히 현재 국내에서 적용하고 있는 임계지속기간을 결정하는데 있어 큰 호우사상의 전체가 아닌 일부분만을 고려하여 유출해석에 적용하게 될 가능성을 배제할 수 없다. 이러한 이유로 저류지 등의 설계에는 특정 재현기간을 가지는 독립 호우사상을 사용하고자 하는 연구가 지속적으로 이루어지고 있는 것이다(EPA, 1986; Adams and Papa, 2000).

독립 호우사상 자체는 그 구조가 매우 복잡하지만, 가장 간단하게 표현한다면 일종의 구형 박스형태가 될 수 있을 것이다. 이 때 호우사상의 구성요소는 지속기간(시점과 종점)과 총 강우량(또는 평균 강우강도) 등이 된다. 단변량 빈도해석의 경우, 주어진 지속기간에 대한 총 강우량을 고려하므로 마치 호우사상처럼 판단될 수도 있으나, 사용되는 자료가 호우사상의 일부분이라는 점에서 호우사상으로 정의되기는 어렵다. 호우사상으로 판단되려면 호우사상의 시점 및 종점, 즉 호우사상의 지속기간이 임의로 변경되어서는 안 된다. 따라서 호우사상을 고려하는 경우, 단변량으로 빈도해석을 수행하는 것은 매우 부적절하며 이런 이유로 이변량 빈도해석이 대두되는 것이다. 이미 국외에서는 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며(Yue, 2000; Yue and Rasmussen 2002; Kao and Govindaraju, 2007), 국내에서도 이와 관련된 여러 연구사례를 찾아 볼 수 있다(권영문과 김태웅, 2009; 박민규 등, 2010; 유철상과 박민규, 2011).

본 연구에서는 독립 호우사상을 이변량 빈도해석하여 얻은 결과를 이용하여 유출해석하는 경우, 단변량의 빈도 해석 결과를 유출해석하는 경우와 어떻게 다른지를 평가

해 보고자 한다. 호우사상의 빈도해석에 필요한 연최대치 독립 호우사상 계열은 박철순과 유철상(2011)에서 제시된 결과를 이용하였으며 유출해석을 위해서는 중랑천, 청계천, 우이천 유역 등 규모가 상이한 세 유역을 선정하였다. 유출모형으로는 Clark 모형을 이용하였으며, 직접유출은 SCS 방법을 적용하여 계산하였다. 추가적으로 유출모형의 매개변수 및 시간분포 방법이 첨두 유출량에 미치는 영향을 민감도 분석을 통해 고찰하였다.

2. 강우 자료의 이변량 빈도해석

2.1 대상 자료

본 연구에서는 1961년부터 2010년까지 서울지점의 시강우 자료에 대해 박철순과 유철상(2011)에서 결정한 연최대치 독립 호우사상을 대상으로 이변량 빈도해석을 수행하였다. 이 연구에서 제시한 연최대치 독립 호우사상의 총강우량, 평균 강우강도, 그리고 지속기간을 연도별로 도시하면 Fig. 1과 같으며, 호우사상의 구성요소(총강우량, 평균 강우강도, 지속기간)별 통계특성은 Table 1과 같다.

이변량 빈도해석 방법을 적용하여 여러 지속기간의 호

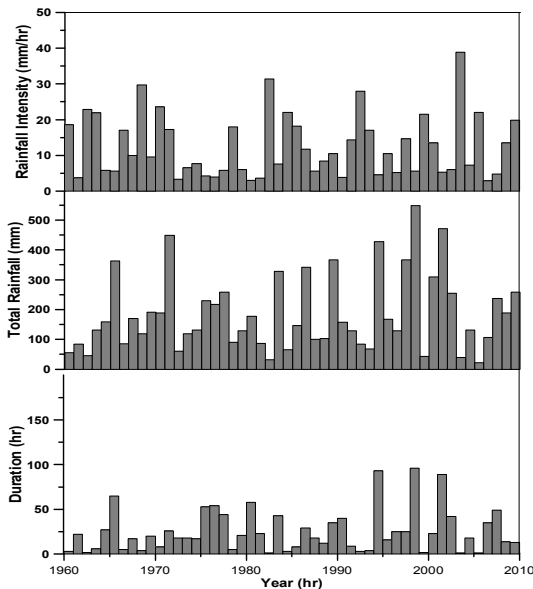


Fig. 1. Annual Maximum Independent Rainfall Event Series

Table 1. Statistics of the Annual Maximum Independent Rainfall Event Series (Park and Yoo, 2011)

Statistics	Rainfall duration (hr)	Total rainfall (mm)	Rainfall Intensity (mm/hr)
Average	25.3	183.4	12.5
Standard deviation	23.9	127.2	8.7

우사상을 결정하기 위해서는 먼저 분석 대상이 되는 두 변량을 선정하여야 한다. 기존 연구에서는 호우사상의 여러 구성요소들 중에서 어느 것이라도 대상변량으로 이용할 수 있는 것으로 보았으나(Zhang and Singh, 2007), 강우 지속기간과 재현기간과의 연관성이 명확하지 않기 때문에(유철상과 박민규, 2011) 본 연구에서는 총강우량과 강우강도를 대상변량으로 선정하였다.

2.2 이변량 빈도해석

2.2.1 적합도 검토 및 매개변수 추정

본 연구에서 선정한 대상 자료가 이변량 극치분포를 따르는지를 확인하기 위해 적합도 검토를 수행하였다(Table 2). 이변량 극치분포는 Kotz et al. (2000)에서 정리한 바와 같이 두 변량의 주변확률분포가 GEV (Generalized Extreme Value) 분포형을 가지는 Gumbel 로지스틱 모형을 고려하였다. 이 경우의 결합확률분포는 다음 Eq. (1)과 같다.

$$F_{Y_1, Y_2}(y_1, y_2) = \exp[-(y_1^{1/m} + y_2^{1/m})^m] \quad (1)$$

위 식에서 $y_i (i=1,2)$ 는 Eq. (2)와 같은 형태의 GEV 분포 (Frechet 분포)를 따르는 독립된 변량을 Eq. (3)으로 표현되는 Frechet 주변확률변수로 변환함으로써 얻어진 값이다.

$$F_{X_i}(x_i) = \exp[-(1 + s_i \frac{x_i - a_i}{b_i})^{(-1/s_i)}] \quad (2)$$

$$y_i = [1 + s_i \frac{x_i - a_i}{b_i}]^{(-1/s_i)} \quad (3)$$

여기서 x_i 는 Frechet 변환 전의 독립된 변량을 의미하고, a_i 는 GEV 분포의 위치모수(location parameter), b_i 는 축척모수(scale parameter), s_i 는 형상모수(shape parameter)이다. 두 변수 간의 결합특성을 나타내는 회합모수(association parameter) m 은 최우도법에 대응하는 추정 값으로 다음 Eq. (4)로부터 결정된다(Kotz et al., 2000).

$$F_{Y_1, Y_2}(\mu_1, \mu_2) = (\frac{1}{2})^{2^{1/m}} \quad (4)$$

위 식에서 $\mu_i (i=1,2)$ 는 표본자료에 대한 각 변량의 중앙값(median)을 의미한다. 이변량 극치분포에 대한 적합도

검토는 각 변량의 주변확률분포가 극치분포를 따르는지를 확인함으로써 이루어진다. 적용된 적합도 검토방법은 χ^2 방법과 K-S방법 두 가지이며, 유의수준은 5%이다.

그 결과, 본 연구에서 선정된 두 변량인 총강우량 및 평균 강우강도 모두 이변량 극치분포에 적합한 것으로 확인되었다(Table 2). 다음으로 본 연구에서는 최적화기법을 통해서 Eq. (5)로 표현되는 대수우도함수를 최대화시킴으로써 이변량 극치분포의 매개변수를 결정하였으며(Haan, 2002; Rao and Hamed, 2000), 그 결과는 Table 3과 같다.

$$L(a_i, b_i, s_i) = n \log(a_i) - (1 + \frac{1}{s_i}) \sum_{i=1}^n \log \left[1 + s_i \frac{X_i - a_i}{b_i} \right] - \sum_{i=1}^n \log \left[1 + s_i \frac{X_i - a_i}{b_i} \right] \left(\frac{1}{s_i} \right) \quad (5)$$

2.2.2 이변량 빈도분석 결과

먼저 Eq. (1)으로 표현되는 총 강우량과 평균 강우강도의 결합확률분포를 Fig. 2(a)와 같이 평면상에 도시하였다.

이는 결합 재현기간을 산정하는데 있어 기본 자료로 이용되며, 이를 통해 산정한 결합 재현기간은 Fig. 2(b)와 같다.

위에 제시된 Fig. 2를 통해서 재현기간 및 지속기간별 호우사상의 크기를 확인할 수 있다. 예를 들면, Fig. 2(b)에서 10년의 재현기간과 6시간의 지속기간에 대한 호우사상의 크기가 119mm로 결정되는 과정을 살펴보면, 먼저 Fig. 2(b)의 기울기에 해당하는 강우 지속기간(6시간)을 고정하고, 10년의 결합재현기간과 만나는 지점에 대한 세로축의 값인 총 강우량(119mm)을 읽으면 그 크기가 결정된다. 본 연구에서는 몇 가지의 지속기간 및 재현기간별 호우사상 크기를 자세히 살펴보았으며, 이는 Table 4와 같다.

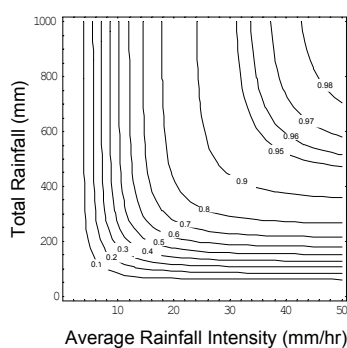
위 결과를 기존의 방법과 비교하기 위해서 단변량 빈도분석 결과를 나타낸 것이 Table 5이다. 단변량 빈도분석은 임의구간 동안 내린 총 강우량의 크기, 즉 기존의 연최대치 강우계열을 고려하는 방법이며, 그 결과로는 건설교통부(2000)에서 제시한 확률강우량도를 인용하였다.

Table 2. Results on the Test of Goodness of Fit about the Bivariate External Distribution

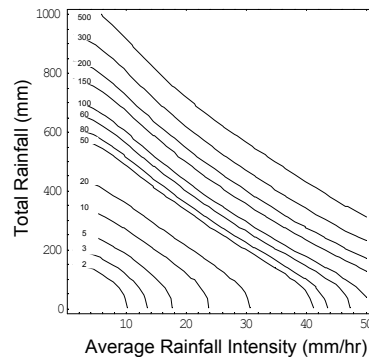
	Total rainfall	Average rainfall intensity	Critical value
χ^2	1.12	5.20	5.99
K-S	0.08	0.14	0.17

Table 3. Results on the Estimation of Parameters about the Gumbel Logistic Model

	Location parameter (a_i)	Scale parameter (b_i)	Shape parameter (s_i)	Association parameter (m)
Total rainfall (mm)	119.399	82.359	0.177	0.9810
Average rainfall intensity (mm/hr)	7.963	5.521	0.209	



(a) cumulative joint probability



(b) joint return period

Fig. 2. Cumulative Joint Probability and Joint Return Period

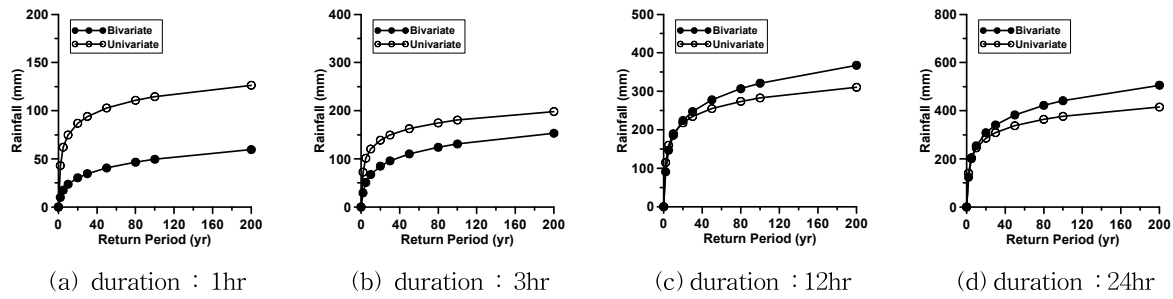


Fig. 3. Comparison with the Results on Bivariate and Univariate Frequency Analysis Followed by Rainfall Duration (hour)

Table 4. Total Rainfall of Storm Events (mm) Followed by Rainfall Duration and Return Period Through the Bivariate Frequency Analysis

Return period (yr)	Rainfall duration (hr)							
	1	2	3	6	9	12	18	24
2	10.0	19.8	29.3	55.0	75.3	90.8	111.6	123.7
5	17.5	34.6	50.9	92.2	123.3	146.9	180.2	200.8
10	23.6	46.3	67.4	119.0	156.7	185.4	226.5	254.3
20	30.3	59.0	84.9	146.1	190.4	224.2	273.7	308.4
30	34.6	67.0	95.8	162.6	210.5	247.4	301.9	340.4
50	40.5	77.8	110.1	183.9	236.8	277.8	338.5	382.4
80	46.5	88.3	123.9	204.4	262.0	306.7	373.6	421.8
100	49.5	93.6	130.8	214.4	274.3	321.0	390.8	441.5
200	59.6	110.8	153.1	247.1	314.8	367.7	447.4	505.8

Table 5. Probability Rainfall (mm) Followed by Rainfall Duration and Return Period Through the Univariate Frequency Analysis

Return period (yr)	Rainfall duration (hr)							
	1	2	3	6	9	12	18	24
2	43.0	61.1	72.3	93.0	105.9	114.8	130.7	141.0
5	62.1	86.5	101.3	129.4	147.0	159.8	186.4	204.0
10	74.8	103.4	120.4	153.5	174.3	189.5	223.3	245.7
20	87.0	119.5	138.8	176.6	200.4	218.1	258.7	285.7
30	94.0	128.8	149.4	189.9	215.5	234.5	279.1	308.7
50	102.8	140.4	162.6	206.5	234.2	255.1	304.6	337.5
80	110.8	151.1	174.7	221.7	251.5	273.8	327.9	363.9
100	114.6	156.1	180.5	228.9	259.6	282.8	338.9	376.4
200	126.4	171.7	198.2	251.3	284.9	310.4	373.1	415.0

Tables 4 and 5에 나타난 결과를 살펴보면, 먼저 강우 지속기간이 짧은 경우(1시간)와 긴 경우(24시간)에 대한 빈도해석 결과가 매우 다르다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 지속기간이 짧은 경우, 기존과 같은 단변량 빈도해석을 통한 확률강우량과 이변량 빈도해석을 적용한 경우에 대한 결과의 차이가 매우 큰 것으로 나타났다. 반면에 지속기간이 길어짐에 따라서 단변량 및 이변량 빈도해석 결과의 차이는 현저히 작아지는 것으로 확인된다. 이를 자세히 살펴보면, 지속기간이 1시간인 경우, 단변량 빈도해석을 통한 재현기간 100년의 확률강우량은 약 114.6mm이며 이는 이변량 빈도해석을 적용한 경우(49.5mm)에 비해서 약 2배 이상의 큰 값이다. 그러나 지속기간이 24시간인 경우, 단변량 빈도해석을 이용한 재현기간 100년의 확률강우량은 약 376.4mm로, 이변량 빈도해석을 적용한 경우(441.5mm)와의 차이가 매우 작아지는 것으로 확인된다.

또 한 가지 살펴볼 수 있는 것은 지속기간이 9시간 이상인 경우, 단변량 빈도해석 결과와 이변량 빈도해석 결과가 특정 재현기간을 기점으로 역전되어 나타난다는 점이다(Fig. 3). 즉, 지속기간이 9시간인 경우, 30년의 재현기간에 해당하는 단변량 빈도해석 결과는 이변량 빈도해석 결과보다 크다. 그러나 재현기간이 50년 이상인 경우에는 그 결과가 역전되어 나타나는 것이다. 이러한 결과는 결국 기존 단변량 빈도해석 결과가 실제 발생 가능한 호우사상의 크기에 비해서 과소 추정되었을 가능성이 매우 크다는 것을 의미한다.

3. 유출해석의 민감도 분석

3.1 유출해석 개요

본 연구에서는 도시유역 및 자연유역에 대해 적용이 가능한 Clark 단위도법을 이용하여 유출해석을 수행하였다. 유효우량 산정을 위해서는 현재 국내의 실무에서 일반적으로 적용하고 있는 SCS (Soil Conservation Service) 방법을 이용하였다. 위와 같은 방법을 적용하는 경우, 유출모형의 매개변수인 집중시간(T_c)과 저류상수(K), 그리고 유출곡선지수(CN)를 결정해야 한다. 본 연구에서는 몇 가지 경우의 매개변수 조합을 고려하여 이들 매개변수가 침투유출량에 미치는 영향을 검토하였다. 아울러 확률강우의 시간분포 방법에 따른 영향도 함께 고려하여 그 결과를 살펴보았다. 참고로, 비 현실적이기는 하지만 상대적인 비교를 위해 유역면적으로 50 km²를 일괄 적용하였으며, 면적강우로는 서울지점에 대한 단변량(건설교통부, 2000) 및 이변량(본 연구) 빈도해석 결과를 적용하였다.

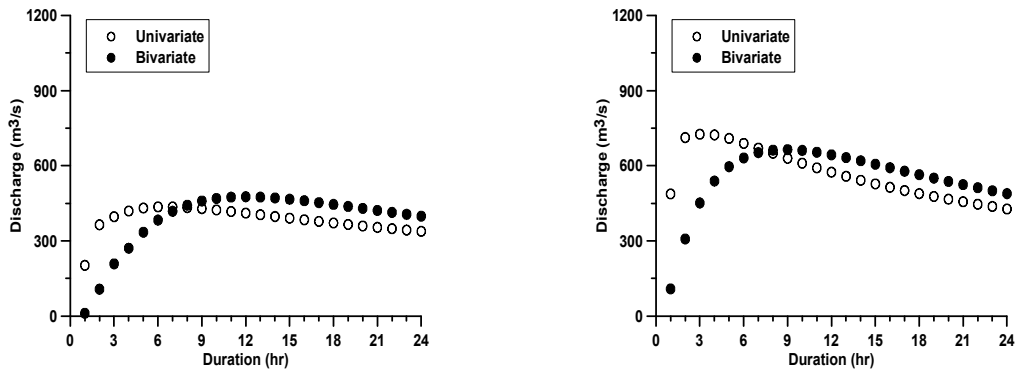
3.2 유출모형 매개변수에 대한 민감도 분석

본 연구에서는 먼저 유출모형의 매개변수(T_c 와 K)로 1시간, 3시간, 6시간, 12시간을, CN값으로는 60 및 80을 고려하여 여러 경우에 대한 유출해석 결과를 비교하였다. 이를 위해 먼저 100년의 재현기간에 해당하는 여러 지속기간의 단변량 및 이변량 설계강우에 대한 시간분포 방법으로 현재 실무에서 적용하고 있는 Huff방법(Huff, 1967)을 이용하였다. Huff 방법의 적용을 위해서는 강우 시간간격을 결정해야 하며, 본 연구에서는 10분을 고려하였다. 구축된 여러 지속기간의 호우사상을 입력자료로 하여 유출해석한 결과는 Fig. 4와 같으며, Fig. 4는 여러 지속기간의 단변량 및 이변량 설계강우가 발생시키는 침투유출량만을 나타낸 결과이다.

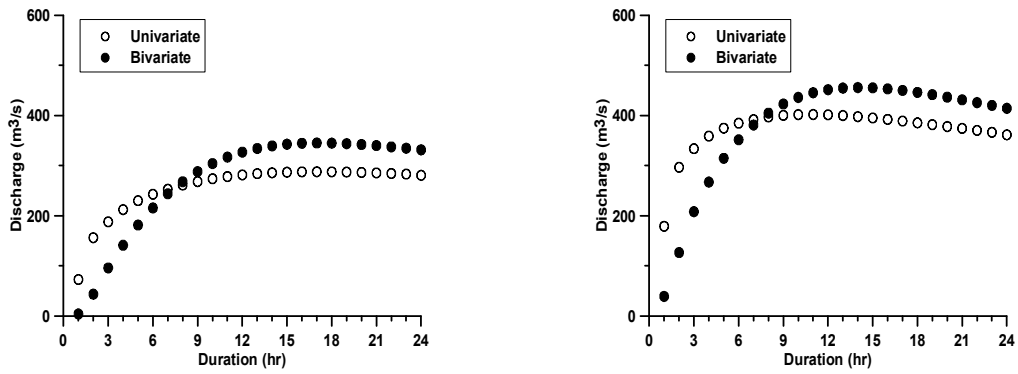
Fig. 4의 좌측 그림에서 단변량 및 이변량 설계강우를 적용한 경우를 비교해서 살펴보면, 강우 지속기간이 증가함에 따라서 단변량 및 이변량 설계강우를 적용한 유출해석 결과가 역전되는 것으로 나타났다. 즉, 지속기간이 짧은 경우, 단변량 빈도해석 결과가 이변량 빈도해석 결과보다 다소 큰 침투유출량을 발생시키는 것으로 나타나지만, 특정 지속기간(본 연구의 경우, 8시간)부터 그 결과가 반대로 나타나는 것이다. 집중시간(T_c)과 저류상수(K)가 증가함에 따라서 모든 지속기간에 대한 침투유출량이 점차 감소하기는 하지만, 그 경향성은 동일한 것으로 확인된다. 아울러 이러한 결과는 10분 및 60분의 강우 시간간격을 적용한 두 경우에서 모두 나타나는 것으로 확인된다.

CN값을 다소 증가시킨 경우(Fig. 4의 우측그림)에서도 앞서 그림 4의 좌측그림에서 살펴본 바와 동일한 경향성을 살펴볼 수 있다. 즉, 지속기간이 짧은 경우, 단변량 설계강우를 적용한 경우가 이변량 설계강우를 적용한 경우보다 침투유출량이 크게 나타나지만 지속기간이 증가함에 따라서 그 결과가 역전되어 나타나는 것이다.

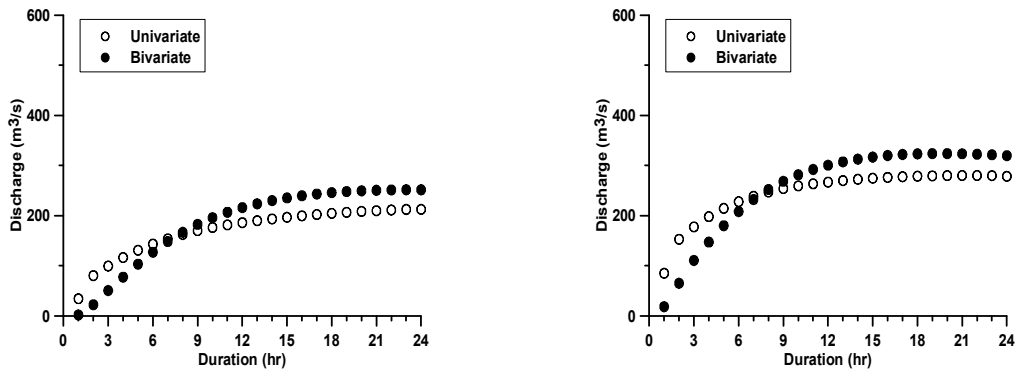
그러나 특정 경우에 있어서는 다소 다른 결과가 나타나기도 한다. 예를 들어, 1시간의 T_c 와 K 를 적용하고, CN값으로 80을 적용한 결과(Fig. 4(a)의 우측그림)에서는 이변량 설계강우를 적용한 결과가 단변량 설계강우를 적용한 경우보다 다소 작은 것으로 나타난다. 그러나 이러한 결과의 원인은 짧은 T_c 와 K 의 영향과 CN값의 크기로 인해 증가된 유효우량이 강우량은 매우 크지만 지속기간이 짧은 호우사상(지속기간이 짧은 단변량 설계강우)으로부터 발생 가능한 침투유출량을 크게 증가시켰기 때문이다. 그러나 이 경우를 제외한 나머지 경우에는 앞서 Fig. 4의 좌측그림(CN값을 60으로 적용한 경우)에서와 동일한 결



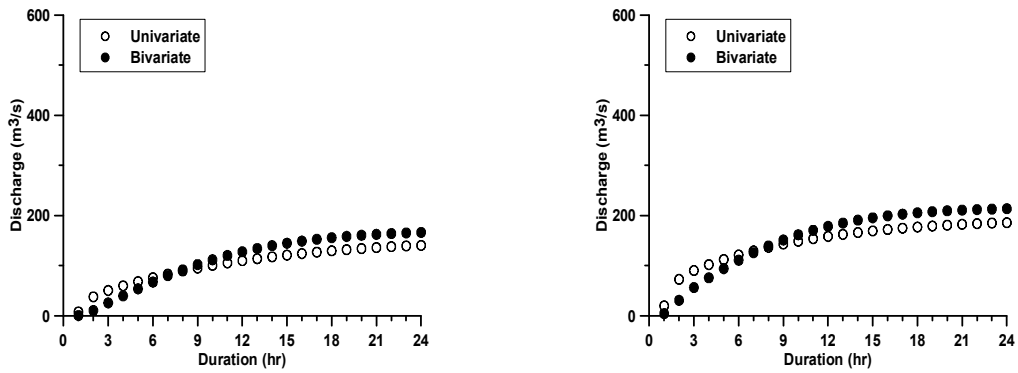
(a) $T_c = K = 1$ (left: CN=60, right: CN=80)



(b) $T_c = K = 3$ (left: CN=60, right: CN=80)



(c) $T_c = K = 6$ (left: CN=60, right: CN=80)



(d) $T_c = K = 12$ (left: CN=60, right: CN=80)

Fig. 4. Comparison with the Peak Discharge Followed by the Parameters (T_c , K , CN) of Runoff Model

과를 보임을 알 수 있다.

이상의 결과를 종합해보면, T_c 와 K , 그리고 CN에 따라서 침투유출량 결과가 다소 다르게 나타나기는 하나, 전체적으로 단변량 설계강우를 적용한 경우보다는 이변량 설계강우를 적용한 경우가 더욱 큰 침투유출량을 발생시키는 것으로 나타났다. 이는 결국 단변량 빈도해석과 이변량 빈도해석에 따른 설계강우량의 차이로 인해 발생한 결과이다. 즉, 기존과 같이 임계지속기간의 개념을 적용하여 설계홍수량을 결정하는 경우에는 당연히 단변량 설계강우를 적용한 경우보다 이변량 설계강우를 적용한 경우가 더욱 크게 되는 것이다. 아울러 이러한 결과는 기존과 같이 단변량 빈도해석 방법을 적용하는 경우, 주어진 재현기간에 대해 실제 발생 가능한 홍수량보다 과소 추정된 확률홍수량을 설계기준으로 적용하게 됨을 의미한다.

3.3 강우 시간분포 방법에 대한 영향 검토

본 연구에서는 시간분포 방법이 유출해석 결과에 미치는 영향을 추가적으로 검토하였다. 이를 위해 앞선 절에서 사용한 몇 가지의 매개변수들과 강우의 시간분포 모형들 중 교호블록 방법을 추가적으로 적용하고, 이를 Huff 방법을 적용한 경우와 비교하였다. 두 가지 시간분포 방법에 적용되는 강우 시간간격으로는 10분을 동일하게 사용하였다. 그 결과를 나타내면 Fig. 5와 같다.

두 그림을 살펴보면, 먼저 시간분포 방법에 따라서 그 결과의 차이가 매우 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 즉, 전체적으로 Huff방법을 적용한 결과보다는 교호블록 방법을 적용한 경우의 침투유출량이 더욱 크게 나타난 것이다. 이는 Huff 방법을 적용하는 경우, 최대강우강도가 교호블록 방법을 적용하는 경우보다 작아지게 되고, 또한 교호블록 방법을 적용하는 경우보다 더욱 완만한 시간분포 형태를 갖게 되기 때문이다. 그러나 T_c 와 K 의 증가에 따라서 그 영향이 다소 상이하게 나타나기는 한다. 즉, T_c 와 K 로 12시간을 적용하였을 때 시간분포 방법에 따른 차이가 매우 작아지는 것이다. 이는 T_c 와 K 가 크게 증가함에 따라서 유출해석 결과에 미치는 시간분포의 영향이 상대적으로 작아짐으로 인해 나타난 결과로 판단된다.

다음으로 살펴볼 수 있는 것은 교호블록 방법을 적용하였을 때 침투유출량이 계속해서 증가하고 있다는 점이다. 즉, Huff 방법을 적용한 경우와는 다르게 강우 지속기간의 증가에 따라서 침투유출량이 계속해서 증가하고 있는 것이다. 이러한 결과는 교호블록 방법의 적용과정에서 그 이유를 찾아볼 수 있다. 즉, 교호블록 방법을 적용하는 경

우 최대강우강도는 강우 지속기간에 관계없이 동일하게 된다. 이 경우에 강우 지속기간이 증가함에 따라서 증가하게 되는 여분의 강우량은 최대강우강도 앞뒤에 분포하게 되고, 이에 따라서 침투유출량이 지속적으로 늘어나게 되는 것이다. 예를 들어, 10시간의 확률강우량이 100 mm이고, 12시간의 확률강우량이 120 mm이면 20 (120-100) mm만큼의 강우량이 최대강우강도 앞뒤로 나뉘어 분포되는 것이다. 이와 같이 교호블록 방법을 적용하는 경우에는 Huff 방법을 적용한 경우에 나타나게 되는 임계지속기간을 정확히 결정하기는 어렵게 된다. 그러나 강우 지속기간의 증가에 따른 침투유출량이 점차 수렴하는 형태를 나타나고 있으며, 지속기간이 대략 24시간 정도인 경우에 그 값이 거의 수렴하는 것으로 확인된다.

마지막으로 단변량 및 이변량 설계강우의 적용결과를 비교하여 살펴보면, 교호블록 방법을 적용하는 경우에는 T_c 와 K , 그리고 CN값에 관계없이 동일한 결과가 나타났다. 즉, 이변량 빈도해석 결과가 단변량 빈도해석 결과보다 커지게 되는 지속기간(8시간)부터 침투유출량도 크게 나타나는 것이다. T_c 와 K , 그리고 CN값에 따라서 정도의 차이는 있지만 모든 경우에서 동일한 것으로 확인된다.

4. 실제 유역에서의 유출 해석

4.1 대상 유역

본 연구에서는 유역면적에 따른 유출해석 결과의 차이를 살펴보기 위해서 중랑천 유역과 중랑천 유역 내 청계천 및 우이천 유역을 대상으로 유출해석을 수행하였다. 각 유역에 대한 개황은 다음과 같다.

먼저, 중랑천은 경기도 양주군 주내면 산북리 불국산에서 발원하여 의정부시를 관류하여 하류부인 서울시 성동구 송진동에서 남서방향으로 유하하고, 소근동에 이르러서 유역의 최대 지류인 청계천과 합류한 후, 한강의 우안으로 합류하는 하천이다. 유역 면적은 296.87 km²으로 서울특별시와 의정부시가 전체 유역의 3/4 이상을 차지하고 있는 고밀도의 도심지 및 인구밀집지역이다. 이 유역의 경우에는 농경지를 포함하고 있으며, 이는 주로 상류부 제1, 2 지류연안에 분포하고 있다. 청계천은 유역면적 49.96 km²의 중소규모 도시하천으로 시점부에는 중랑천과 백운동천이 연결되어 있으며, 상류에서는 삼각동천이 유입되며, 하류에서는 성북천과 정릉천이 유입된 후 중랑천과 한강 본류의 합류점으로 연결되는 형태를 지니고 있다. 마지막으로 우이천은 서울시 관할 지방하천으로 중랑천 제1지류로로서, 유역경계는 서쪽으로 북한산, 북쪽으로

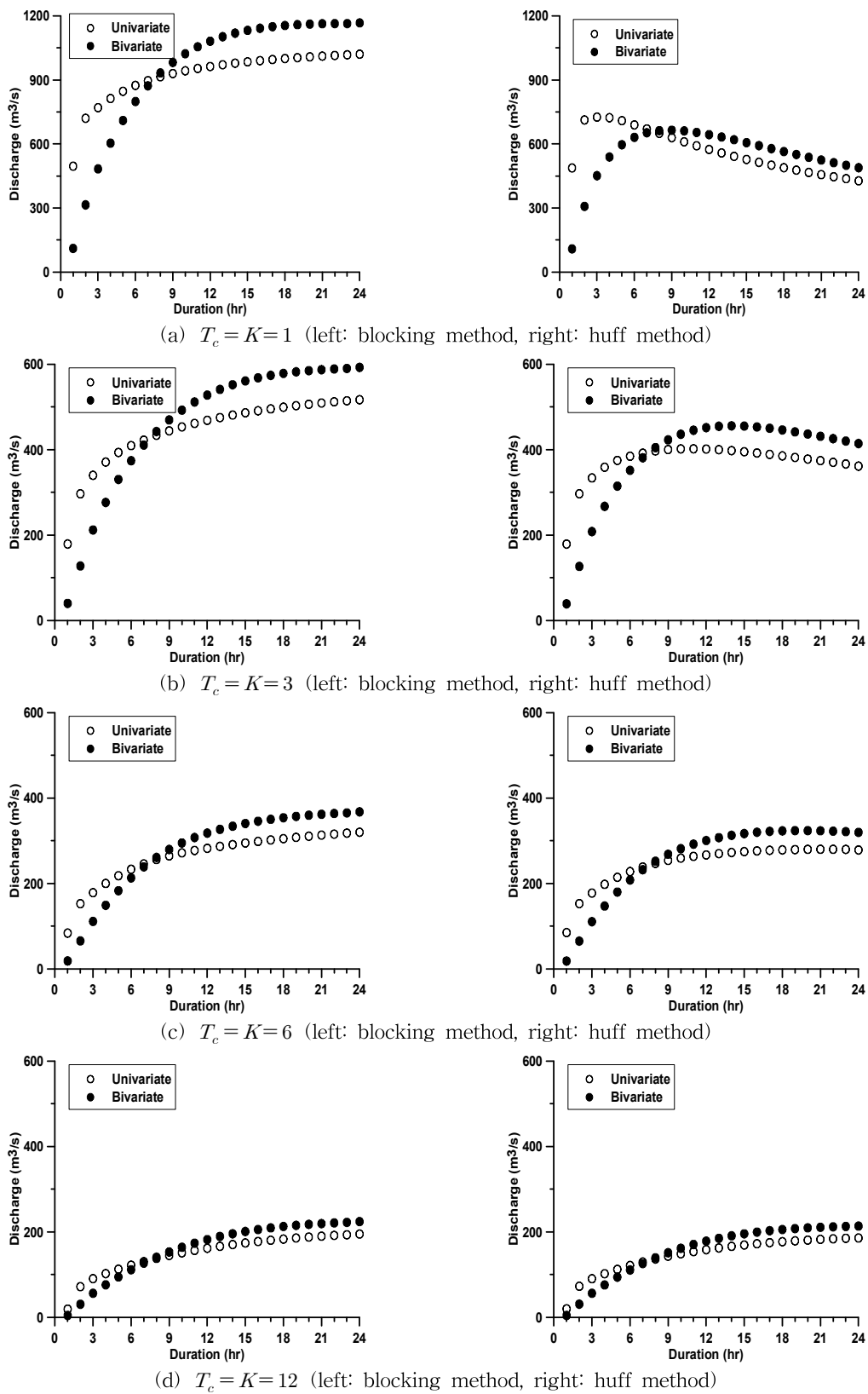


Fig. 5. Comparison with the Peak Discharge Followed by the Method about Temporal Distribution of Rainfall (CN=80)

도봉산, 남쪽으로는 성북구와 경계를 이루고 있다. 우이천 유역은 서울시 도봉구, 강북구, 성북구, 노원구 일부를 포함하며 유역면적은 28.08 km²이다. 세 유역의 지형도는 Fig. 6과 같으며 유역 특성은 Table 6과 같다.

청계천 유역과 우이천 유역에 대한 집중시간(T_C)과 저류상수(K)는 국토해양부(2008)에서 제시한 값을 적용하였다. 한편 중랑천 유역의 경우에는 소유역 분할을 수행하지 않고, 단일 유역으로 고려하였으며 Kraven II 공식과 Sabol 공식을 사용하여 집중시간과 저류상수를 결정하였다. 유출곡선지수(CN)은 국토해양부(2008)에서 제시한 값을 적용하였다. 결정된 유출모형의 매개변수는 Table 7과 같다.

4.2 적용 결과

본 연구에서는 단변량 및 이변량 설계강우를 각각 적용하고, 그 결과를 비교·검토하였다. 설계강우의 시간분포 방법으로는 교호블록 방법과 Huff 방법을 이용하였고, 강

우 시간간격은 10분을 일괄적으로 적용하였다. 중랑천 및 청계천, 그리고 우이천 유역에 대한 유출해석 결과는 Fig. 7과 같다. 아래의 그림은 강우 지속기간이 짧은(1시간) 호우사상과 비교적 긴(24시간) 호우사상에 의한 유출수문곡선을 나타낸 것이다.

Fig. 7에서는 Huff 방법을 적용한 경우보다 교호블록 방법을 적용한 경우가 더욱 큰 유출량을 발생시키는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 앞선 절에서 살펴본 바와 같이 각각의 시간분포 방법이 갖는 특성으로 인해 발생한 결과로 해석할 수 있다.

다음으로 단변량 및 이변량 설계강우를 적용한 결과를 비교해보면, 단변량 설계강우를 적용한 경우, 강우 지속기간이 짧은 경우에 대한 첨두유출량이 이변량 설계강우를 적용한 경우 보다 큰 것으로 나타났다. 반면에 강우 지속기간이 길어짐에 따라서 그 결과가 역전되는 것으로 나타났다. 즉, 이변량 설계강우를 적용하고, 아울러 강우 지속기간이 긴 경우에 대한 첨두유출량이 단변량 설계강우를

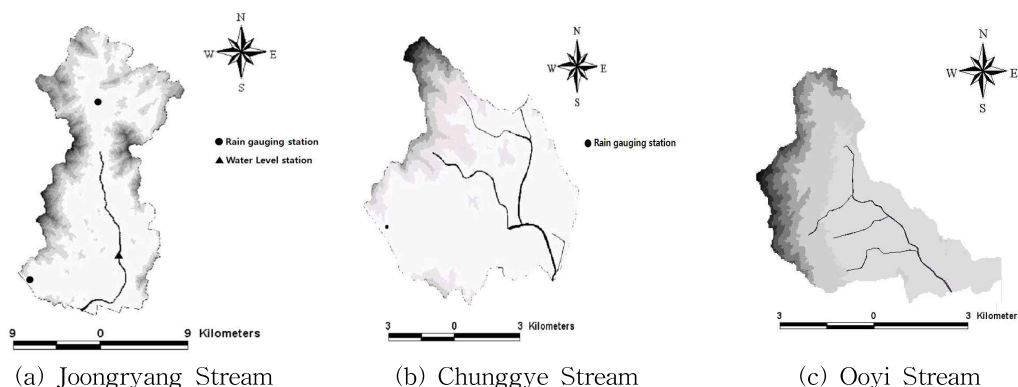


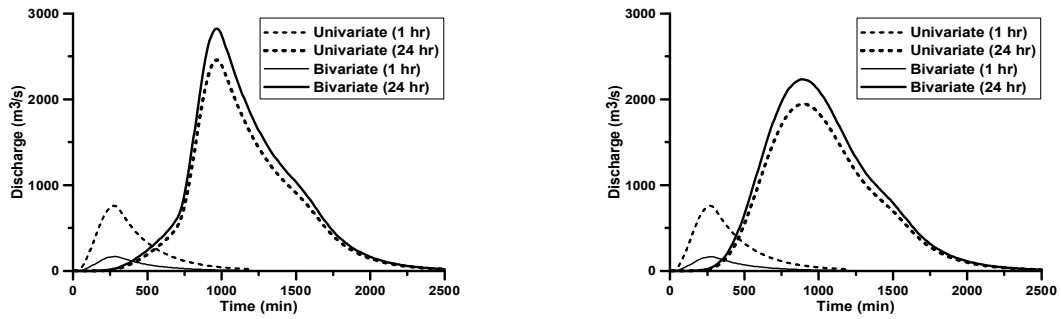
Fig. 6. Topographical Map about Study Basins

Table 6. Basic Characteristics of the Study Basins

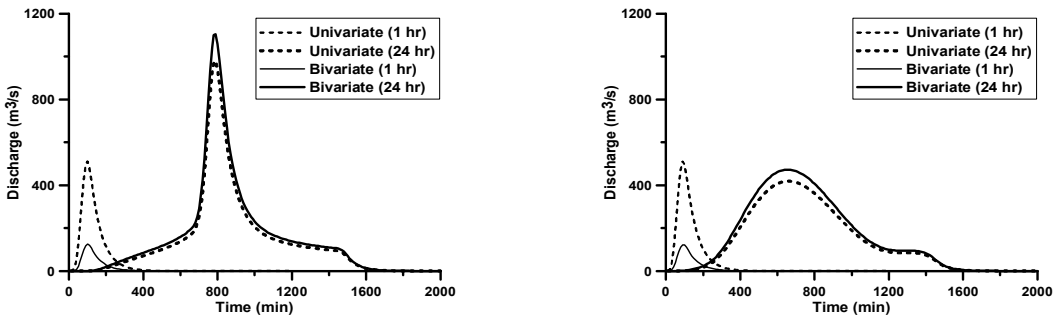
Basin	Basin area (km ²)	Stream length (km)	Average width (km)	Shape factor	Average regime slope
Joongryang Stream	296.87	34.80	8.53	0.25	1/1150
Chunggye Stream	49.62	10.92	4.54	0.42	1/310~1/510
Ooyi Stream	28.08	11.75	2.39	0.20	1/60~1/440

Table 7. Parameters of the Runoff Model by Each Basin

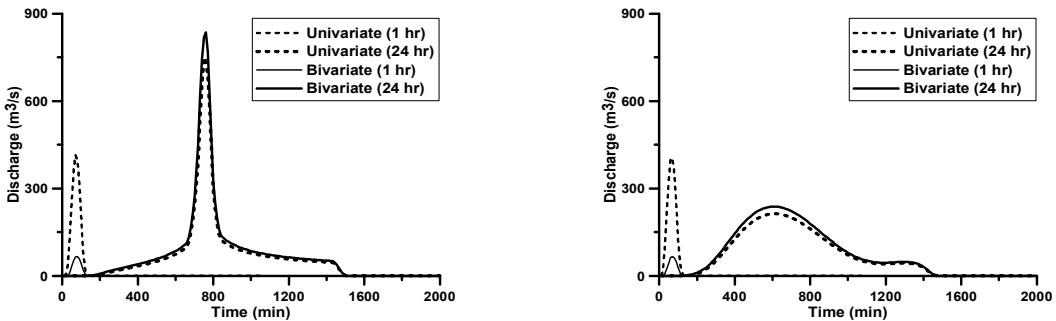
Basin	T_C	K	CN(II)
Joongryang Stream	4.66	4.28	63.3
Chunggye Stream	1.30	1.17	69.3
Ooyi Stream	1.24	0.92	61.2



(a) Joongryang Stream basin



(b) Chunggye Stream basin



(c) Ooyi Stream basin

Fig. 7. Applied Results of the Bivariate and Univariate Design Rainfall Followed by the Method about Temporal Distribution of Rainfall (left: alternating block method, right: huff method)

적용한 경우보다 더욱 커지는 것이다. 이와 같은 결과는 유역 크기와 시간분포 방법에 관계없이 동일한 것으로 확인되며, 이 결과를 모든 지속기간에 대해 살펴보면 Fig. 8 과 같다.

Fig. 8을 살펴보면, 강우 지속기간이 대략 8시간인 경우에서부터 단변량 설계강우를 적용한 경우보다 이변량 설계강우를 적용한 경우의 첨두유출량이 더욱 커지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 교호블록 방법 및 Huff 방법을 적용한 두 경우 모두에서 나타나는 것으로 확인된다.

추가적으로 살펴볼 수 있는 것은 앞선 절에서 살펴본 바와 동일하게 교호블록 방법을 적용하였을 때(Fig. 8의 좌측 그림), 강우 지속기간의 증가에 따라 첨두유출량 또한 계속해서 증가하고 있다는 점이다. 이러한 결과는 단

변량 및 이변량 설계강우를 적용한 두 경우 모두에서 나타나는 것으로 확인된다. 이러한 경우에는 Huff 방법을 적용한 경우와는 다르게 임계지속기간을 명확히 결정하기가 어려워지는 것이 사실이다. 그러나 강우 지속기간이 증가함에 따라 발생하는 첨두유출량의 증가량이 점차 감소하고, 24시간에 가까워지면서 그 값이 점차 수렴하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 설계강우의 시간분포 방법으로 교호블록 방법을 적용하는 경우, 24간의 강우 지속기간이 매우 유의할 수 있음을 나타내는 것이기도 하다.

Huff 방법을 적용한 경우(Fig. 8의 우측 그림)에는 단변량 및 이변량 설계강우를 적용한 두 경우 모두에서 임계지속기간이 명확히 확인된다. 본 연구의 경우, 중랑천 유역에 대해 단변량 설계강우를 적용한 경우의 임계지속

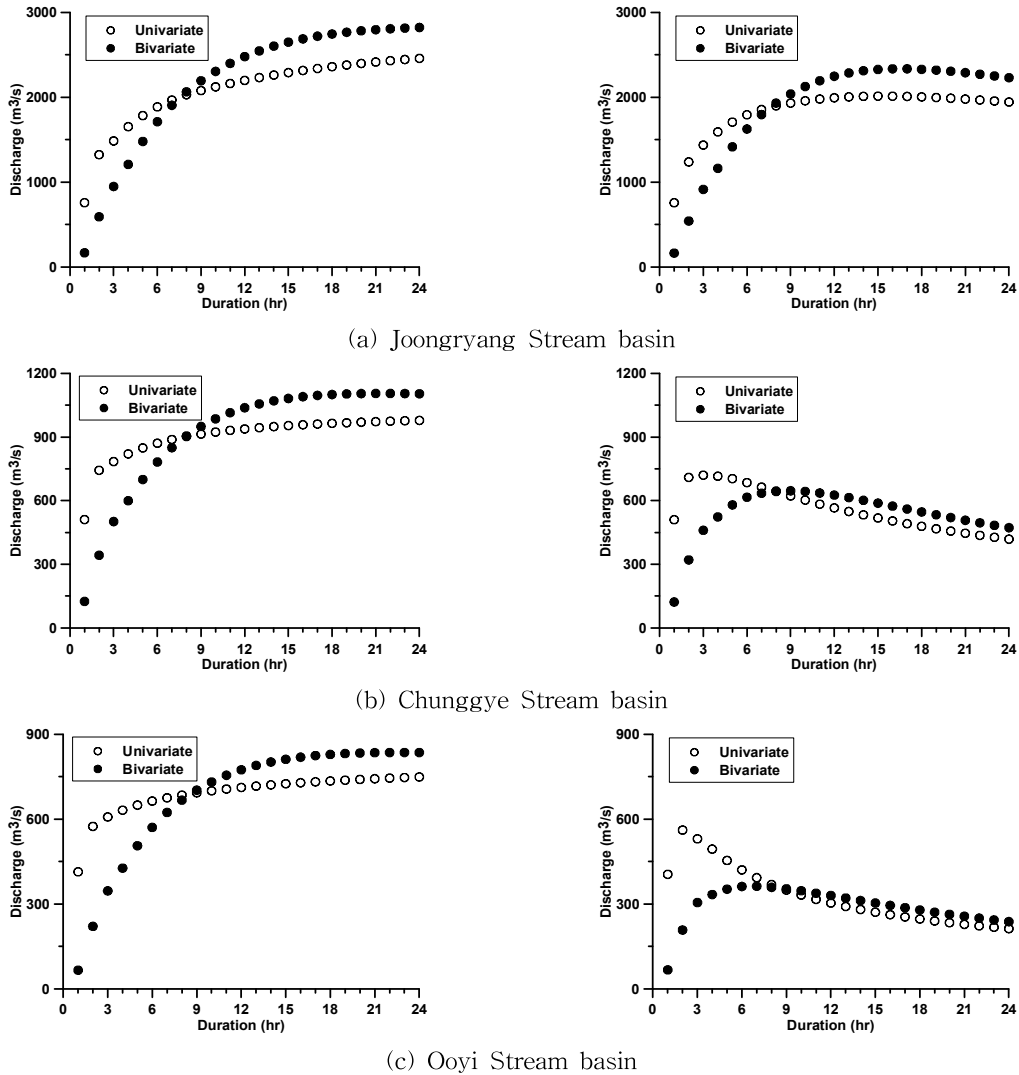


Fig. 8. Peak Discharge by Each Rainfall Duration Followed by the Temporal Distribution of Rainfall and the Method about Frequency Analysis (left: alternating block method, right: huff method)

기간은 15시간, 그 때의 침투유출량은 약 $2014\text{m}^3/\text{s}$ 으로 나타났으며, 이변량 설계강우를 적용한 경우의 임계지속기간은 17시간, 침투유출량은 약 $2336\text{m}^3/\text{s}$ 로 나타났다. 청계천 유역의 경우, 단변량 및 이변량 설계강우를 적용한 경우의 임계지속기간은 3시간 및 9시간이고, 우이천 유역의 경우에는 각각 2시간 및 7시간으로 나타났다. 이와 같이 결정된 임계지속기간의 설계강우가 발생시키는 유출수문곡선을 나타내면 Fig. 9와 같다. 교호블록 방법을 적용한 경우에는 24시간의 강우 지속기간에 대한 유출수문곡선을 비교하여 나타내었다.

중랑천 유역에 Huff 방법을 적용한 결과에서는(Fig. 9의 우측그림), 이변량 설계강우를 적용한 경우의 홍수량이 단변량 설계강우를 적용한 경우보다 약 16% 정도 큰

것으로 나타났다. 그러나 이러한 결과가 유역 크기에 관계없이 동일하게 나타나지는 않는다(Fig. 9(b) and Fig. 9(c)의 우측 그림). 즉, 청계천 유역 및 우이천 유역에 대한 결과에서는 단변량 설계강우를 적용한 경우의 홍수량이 이변량 설계강우를 적용한 경우보다 다소 크게 나타난 것이다. 그러나 이러한 결과는 앞선 절에서 살펴본 Clark 모형의 매개변수(집중시간과 저류상수)와 CN 값의 영향에 의해 나타난 결과와 동일한 것으로 판단된다.

교호블록 방법을 적용한 경우에는 유역 크기와 관계없이 이변량 설계강우를 적용한 경우의 홍수량이 단변량 설계강우를 적용한 경우보다 큰 것으로 나타났다. 중랑천 유역의 경우 약 15%, 청계천 유역의 경우 약 13%, 우이천 유역의 경우에는 약 12% 정도 큰 것으로 나타났다.

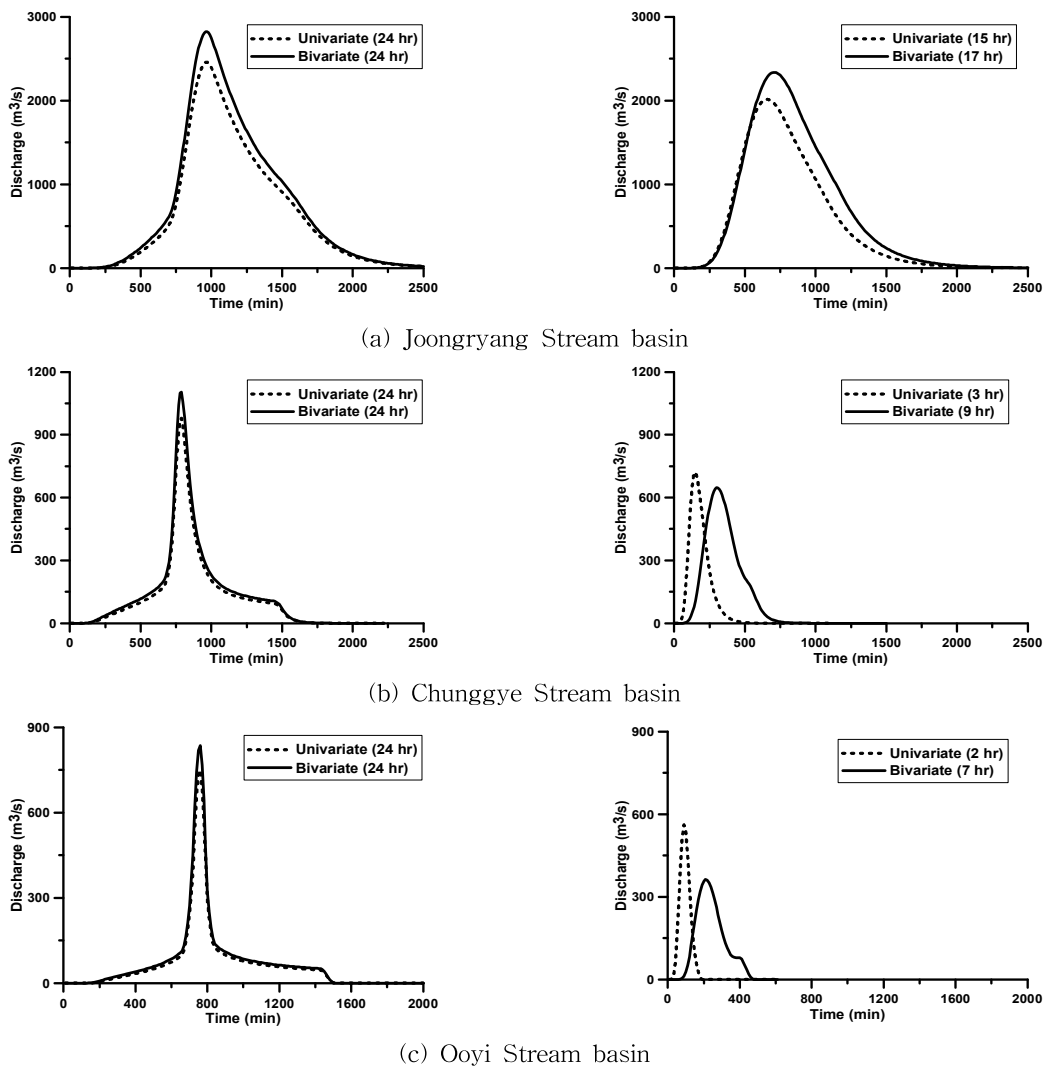


Fig. 9. Comparison with the Discharge Followed by the Model about Temporal Distribution of Rainfall and the Method about Frequency Analysis (left: alternating block method, right: huff method)

5. 결론

본 연구에서는 독립 호우사상을 이용하여 이변량 빈도 해석 및 유출해석을 수행하고, 이를 기존 단변량 빈도 해석 결과와 비교·평가하였다. 이를 위해 먼저 연최대치 독립 호우사상계열의 이변량 빈도해석을 통해 특정 재현기간을 만족하는 여러 지속기간의 호우사상을 결정하였다. 이어 결정된 이변량 빈도해석 결과를 입력자료로 하여 중량천, 청계천, 우이천 유역에 대해 Clark 모형을 이용하여 홍수량을 산정하고, 이를 기존방법을 통해 산정한 홍수량과 비교하였다. 이러한 실제 유역에 대한 유출해석에 앞서 유출모형의 매개변수 및 강우의 시간분포 방법이 침투 유출량에 미치는 영향 검토를 우선적으로 수행하였다. 그

결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 연최대치 독립 호우사상계열의 이변량 빈도해석 결과, 강우 지속기간에 따라서 단변량 빈도해석 결과와의 차이가 상이한 것으로 나타났다. 즉, 지속기간이 짧은 경우 두 경우의 결과 차이가 매우 크고, 지속기간이 길어짐에 따라서 그 차이는 현저히 줄어드는 것으로 나타났다. 아울러 지속기간이 짧은 경우, 단변량 빈도해석 결과가 더욱 크나, 특정 지속기간 이상부터 그 결과가 역전되는 것으로 나타났다. 이 특정 지속기간은 재현기간별로 상이하게 나타났다.
- 2) 교호블록 시간분포 방법을 적용하는 경우가 Huff 방법을 적용한 경우보다 더욱 큰 침투유출량을 발생시키는 것으로 나타났다. 아울러 교호블록 방법을 적

용하는 경우에는 강우 지속기간의 증가에 따라서 첨두유출량이 점차 증가하는 것으로 나타났으나, 강우 지속기간이 대략 24시간 정도 되었을 때 그 값이 거의 수렴하는 것으로 나타났다.

- 3) 중랑천 유역에 대해 Huff 방법을 적용하여 유출해석을 수행한 결과에서는 이변량 설계강우를 적용한 경우가 단변량 설계강우를 적용한 경우보다 더욱 큰 홍수량을 발생시키는 것으로 나타났다. 반면에 청계천 및 우이천 유역의 경우에는 이변량 설계강우를 적용한 경우보다 단변량 설계강우를 적용한 경우의 홍수량이 다소 큰 것으로 나타났다. 그러나 이는 매우 짧은 집중시간, 저류상수와 다소 큰 CN값의 영향으로 인한 결과로 판단된다. 교호블록 방법을 적용한 경우에는 모든 유역에 대해 이변량 설계강우를 적용한 경우가 단변량 설계강우를 적용한 경우보다 큰 홍수량을 발생시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 결국 기존의 방법을 통해 결정된 설계홍수량이 실제 발생 가능한 홍수량에 비해 과소 추정되었을 가능성이 매우 크다는 것을 의미한다. 따라서 실제 발생한 독립 호우사상 자체의 특성을 반영한 설계홍수량의 산정이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것입니다(KRF-2008-313-D01083). 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부 (2000). 한국 확률강우량도 작성.
- 국토해양부 (2008). 한강유역종합치수계획(중랑천 특별권역) 보고서.
- 국토해양부 (2010). 설계홍수량 산정 선진화기획 연구보고서.
- 권영문, 김태웅 (2009). “이변량 강우 빈도해석을 이용한 서울지역 I-D-F 곡선 유도.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제29권, 제2B호, pp. 155-162.
- 박민규, 유철상, 김현준 (2010). “연최대 호우사상 계열을 이용한 측우기자료 및 현대자료의 비교.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제30권, 제2B호, pp. 137-147.
- 박철순, 유철상. (2011). “Freund 이변량 지수분포의 매개변수 추정과정 검토.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제45권, 제2호, pp. 191-201.
- 양희성 (2003). 설계강우의 임계지속기간에 미치는 수문요인들의 영향에 관한 연구. 석사학위논문, 한양대학교, pp. 46-47.
- 유철상, 박민규 (2011). “독립호우사상의 확률론적 해석: 2. 호우사상의 재현기간.” **한국방재학회지**, 한국방재학회, 제11권, 제2호, pp. 137-146.
- 윤용남 (2009). **수문학**. 청문각, pp. 1023.
- 이정식, 신창동, 이봉석 (2008). “설계강우의 임계지속기간과 유역특성인자의 상관성 분석.” **한국방재학회 2008년도 학술발표회논문집**, 한국방재학회, pp. 711-714.
- 정종호, 윤용남 (2009). 수자원설계실무. 구미서관, pp. 68.
- Adams, B.J., and Papa, F. (2000). *Urban Stormwater Management Planning with Analytical Probabilistic Models*. John Wiley & Sons, INC., pp. 55-68.
- EPA (1986). *Methodology for Analysis of Detention Basins for Control of Urban Runoff Quality*.
- Haan, C.T. (2002). *Statistical Methods in Hydrology*, London: Chapman & Hall.
- Huff, F.A. (1967). “Time distribution of rainfall in heavy storms.” *Water Resources Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 1007-1019.
- Kao, S-C., and Govindaraju, R.S. (2007). “A bivariate frequency analysis of extreme rainfall with implications for design.” *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, Vol. 112, D13119, DOI: 10.1029/2007JD008522.
- Kotz, S., Balakrishnan, N., and Johnson, N.L. (2000). *Continuous Multivariate Distributions Volume 1: Models and Applications*, John Wiley & Sons, INC.
- Lee, C.H., Kim, T-W., Chung, G., Choi, M., and Yoo, C. (2010). “Application of bivariate frequency analysis to the derivation of rainfall-frequency curves.” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 24, pp. 389-397.
- Levy, B., and McCuen, R. (1999). “Assessment of storm duration for hydrologic design.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 209-213.
- Rao, A.R., and Hamed, K.H. (2000). *Flood Frequency Analysis*, CRC press, pp. 227-228.
- Yue, S. (2000). “The Gumbel mixed model applied to storm frequency analysis.” *Water Resources Management*, Vol. 14, pp. 377-389.
- Yue, S., and Rasmussen, P. (2002) “Bivariate frequency

analysis: discussion of some useful concepts in hydrological application.” *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 2881-2898.

Zhang, L., and Singh, V.P. (2007). “Bivariate rainfall frequency distributions using Archimedean copulas.”

Journal of Hydrology, Vol. 332, pp. 93-109.

논문번호: 12-019	접수: 2012.02.21
수정일자: 2012.04.26/05.09	심사완료: 2012.05.09