

분단위 강우자료를 이용한 극치강우의 최적 시간분포 연구: 서울지점을 중심으로

A Study on Optimal Time Distribution of Extreme Rainfall Using Minutely Rainfall Data: A Case Study of Seoul

윤 선 권* / 김 종 석** / 문 영 일***

Yoon, Sun-Kwon / Kim, Jong-Suk / Moon, Young-Il

Abstract

In this study, we have developed an optimal time distribution model through extraction of peaks over threshold (POT) series. The median values for annual maximum rainfall dataset, which are obtained from the magnetic recording (MMR) and the automatic weather system (AWS) data at Seoul meteorological observatory, were used as the POT criteria. We also suggested the improved methodology for the time distribution of extreme rainfall compared to Huff method, which is widely used for time distributions of design rainfall. The Huff method did not consider changing in the shape of time distribution for each rainfall durations and rainfall criteria as total amount of rainfall for each rainfall events. This study have suggested an extracting methodology for rainfall events in each quartile based on interquartile range (IQR) matrix and selection for the mode quartile storm to determine the ranking considering weighting factors on minutely observation data. Finally, the optimal time distribution model in each rainfall duration was derived considering both data size and characteristics of distribution using kernel density function in extracted dimensionless unit rainfall hyetograph.

Keywords : minutely rainfall, peak over threshold series, extreme rainfall, time distribution of rainfall, kernel density function

요 지

본 연구에서는 극치강우의 시간분포 연구를 위하여 서울지점 우량관측소의 자기기록지를 1분단위로 독취한 MMR (minutely data using the magnetic recording)자료와 최근 들어 관측을 시작한 AWS (automatic weather system) 분단위 기상관측 자료를 이용하여 연최대치 계열의 중앙값을 기준으로 한 POT (peaks over threshold) 계열 추출을 통하여 강우의 최적 시간분포 모형을 개발하였다. 기존 Huff 방법에서의 최대 단점인 지속기간별 시간분포 변화 특성을 고려하지 못하는 점과 강우사상별 강우총량에 대한 기준강우량의 일괄적용 등의 문제를 개선하였으며, 분단위 관측자료의 가중치 적용을 통한 순위결정으로 최빈분위를 선택하고 IQR (interquartile range) matrix의 적용을 통한 Quartile별 호우사상을 추출하는 방법을 제안하였다. 마지막으로 추출된 분단위 무차원 단위우량주상도에 핵밀도함수를 적용하여 자료의 크기와 분포 특성을 고려한 지속기간별 최적 시간분포형을 유도하였다.

핵심용어 : 분단위 강우, POT 계열, 극치강우, 강우의 시간분포, 핵밀도함수

* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 미래도시연구소 박사후과정

Dept. of Civil and Environ. Eng., KAIST Institute for Urban Space and Systems, Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea.

** Postdoctoral Research Fellow, School of Energy and Environment, City University of Hong Kong, Hong Kong, China

*** 교신저자, 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: ymoon@uos.ac.kr)

Corresponding Author, Dept. of Civil Eng., The University of Seoul, Stripdae-gil 13, Dongdaemun-gu, Seoul 130-743, Korea

1. 서론

수공구조물의 설계를 위해서는 일정기간 이상의 홍수량 자료를 바탕으로 특정지속기간이나 재현기간에 해당하는 첨두홍수량을 결정해야한다. 그러나 도시지역의 중·소하천을 비롯한 대부분의 유역에서는 홍수량관측기간이 짧거나 미계측 유역이 많아 자료의 신뢰성이 떨어지는 문제로 인하여 직접 빈도해석을 사용하지 못하고 있는 실정이며, 특정 빈도에 해당하는 설계유량의 결정은 강우빈도해석을 통한 유출해석으로 얻어지는 것이 일반적이다. 따라서 총강우량으로 주어진 설계우량을 지속기간에 분포시켜 우량주상도를 유도하는 과정이 반드시 필요하며, 같은 설계 강우라 할지라도 우량주상도의 형태에 따라 유출수문곡선의 모양과 첨두가 달라지게 되어 실제 호우특성에 맞는 시간분포 방법을 적용하는 것은 매우 중요한 일이라 할 수 있다.

강우의 시간적 분포에 대한 국내·외 연구는 많은 학자들에 의해 이미 이루어져 왔으며 대표적으로 구분하여 기술하면 다음과 같다. Mononobe 방법과 같이 강우량을 전방위, 중방위, 후방위형 등으로 우량주상도의 형태를 임의로 배열하는 형태로 Honer and Jens (1942)는 미국의 St. Louis에서 강우를 균등분포한 것과 전방위, 중방위, 후방위로 배열하여 발생하는 유출량을 비교·검토 하였으며, Schiff (1943), Ogrosky (1964)에 의해서도 이와 비슷한 연구가 수행되었다. 이후 IDF (rainfall intensity duration frequency) 곡선식이 알려지면서 일명 Chicago 방법이라고 불리는 Keifer and Chu (1957) 방법이 제시되었으며 이는 설계우량의 I.D.F 관계를 이용하여 수학적으로 시간분포를 모형화한 형태이다. 이와 유사한 연구로는 Ordon (1974), Arnell et al. (1984) 등의 연구가 있다. 다음으로 강우 계측자료의 누가곡선을 그대로 이용하는 형태로 여러 호우의 누가곡선을 평균하거나 지속기간의 제한 또는 강우 크기의 제한을 두어 평균하는 방법이다. 대표적 연구로 미국토양보존국(U.S. Soil Conservation Service, 1972)은 Type I과 Type II로 시간분포형을 구분하여 제시한 사례가 있으며, Huff (1967)는 미국 Illinois주의 400 mi^2 의 대상유역에 49개 우량계를 정방향으로 균등하게 배치하여 12년간의 강우관측 자료를 바탕으로 4구간법(quartile classification)에 의한 시간분포 누가확률곡선을 제시하였다. 마지막으로, Pilgrim and Cordery (1975)의 평균이동법과 Yen and Chow (1977)의 무차원 1, 2차 모멘트를 이용하여 시간분포를 삼각형과 사다리꼴 우량주상도의 형태로 단순화하는 방법 등이 제시된바 있다(국토해양부, 2000).

국내의 경우, 서승덕(1965)에 의해 최초로 호우의 시간분포 개념이 고찰되었으며, 그 이후로도 박찬영 등(1981), 서병하 등(1981), 이근후(1983) 등을 포함하여 많은 연구가 진행되었다. 최근 들어 이정규와 추현제(2006)에 의하여 Huff의 4분위법을 이용한 지속기간별 연 최대치 강우의 시간분포 특성에 대한 연구를 한바 있으며, 장수형 등(2007)은 Huff 방법의 한계점을 파악하고 지속기간별 시간분포 특성을 검토함으로써 국내유역에 적합한 Huff 강우시간분포방법의 개선방안을 연구하였다. 또한, 주진걸 등(2007)은 Intervent Time Definition (IETD)결정법에 의한 강우의 시간분포곡선을 유도하여 도시유역의 유출특성을 고려한 강우분포모형을 개발한바 있다. 현재 국내 수공구조물 설계에 있어 강우의 시간분포 적용시 국토해양부(2000)에서 제시한 지역별 설계강우의 시간적 분포방법 중 Huff의 4분위 방법을 많이 이용하고 있다. 그러나 이 방법은 일정강도 이상의 단일호우를 중심으로 한 관측 강우자료에 대한 설계강우의 시간분포 방법으로, 강우지속기간에 상관없이 하나의 누가곡선만을 이용하게 되어 강우지속기간에 따른 강우분포의 특성이 반영되지 못한다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 Huff (1967) 방법에서의 최대 문제점인 지속기간별 시간분포 변화 특성을 고려하지 못하는 점과 강우사상별 강우총량에 대한 기준강우량의 일괄적용 등의 문제점을 개선하고자 하였으며 정형화된 형태의 시간분포형의 적용과 소규모 유역에서 첨두홍수량이 작게 산정되는 문제점을 보완하였다. 이를 위하여 서울지점의 분단위 관측자료를 바탕으로 임의 지속기간에 따라 연최대치 자료의 중앙값을 기준으로 POT (peaks over threshold) 계열을 구축하고 Quartile별 호우사상 구분과 극치강우의 순위 결정을 통한 가중치 적용으로 최빈분위를 결정하는 방법을 제시하였다. 또한, 선정된 최빈분위 중앙치 강우에 대한 핵밀도함수(kernel density function)를 적용하여 자료의 크기와 분포 특성을 고려한 지속기간별 최적 시간분포형을 유도하는 방법을 제안하고자 한다.

2. 분석대상자료

2.1 분단위 강우자료

우리나라에서 가용한 분단위 강우자료로는 자기기록지를 1분단위로 독취한 강우자료 MMR (minutely data using the magnetic recording), 강우강도계 강우자료 MRI (minute rainfall intensity), AWS (automatic weather system) 관측소에서 측정되고 있는 강우자료, 광학강우강도계 강우

자료 ORG (optic rain gauge) 등으로 나눌 수 있다(기상연구소, 1998; 한국전자통신연구원, 2001; 기상청, 2004). 이중 MMR자료는 현재 운영되고 있는 전국에 기상청산하 76개 강우관측소의 관측개시일 부터 1999년까지의 분단위 강우자료를 확보하고 있다. 전산화된 자료의 측정해상도는 0.1 mm이며, 기상청 자기기록지를 수치화하여 시단위 강우자료와 동일한 지점의 자료라는 점과 관측지점이 전국에 걸쳐 분포되어 있다는 점에 있어 장점이 있다.

최근 MMR자료는 고주파 무선통신분야에서 순간적으로 발생하는 큰 강우강도에 의한 통화품질 연구에 활발히 활용되고 있으며, 특히 수자원 분야에서는 유철상 등(2007)의 연구에서 모포마 분포를 적용한 분단위 IDF관계를 유도하였으며, 오태석과 문영일(2008)에 의해 고정시간과 임의시간에 따른 우리나라 연최대강우량의 환산계수 산정에 활용 되는 등 향후 추가 연구의 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 분단위 관측자료의 보유연한과 관측지점의 분포특성 등을 고려하여 관측개시일 부터 1999년까지는 MMR자료를 사용하였으며, 2000년부터 2009년까지의 자료는 최근 들어 전도형 자기우량계(tipping bucket type rain gauge)를 도입하여 관측을 시작한 자동기상관측시스템(AWS)의 자료를 사용하였다.

분단위 관측 자료의 적용성 검토를 위하여 기상연구소(1998) 및 한국전자통신연구원(2001), 기상청(2004)에서도 적용한 바 있는 분단위 관측자료를 60분 단위로 합성한

자료를 생성하여 이를 시단위 관측자료와 직접 비교하는 방법을 사용하였으며, 이를 바탕으로 분단위 관측자료의 연최대치계열을 생성하여 시간단위 관측자료 연최대치계열과의 상관관계를 검토하였다. 이는 극치강우의 시간분포 특성 연구를 위한 중요한 작업이라 사료되며 분석결과 강우지속 1 hr에서 상관관계가 0.946으로 비교적 낮게 나타났지만 이는 신뢰할 만한 수준이라 사료되며 강우지속기간이 길어질수록 연최대치 계열의 상관관계가 높게 나타나는 것을 확인하였다. 나머지 모든 지속기간에서 상관관계가 0.997 이상으로 비교적 높게 나타나 분단위 관측자료의 활용성을 검증하였다. 다음 Fig. 1은 분단위 관측자료와 시간자료의 연최대치 계열에 대한 지속기간별 상관도를 나타내었다.

2.2 분자료의 POT계열 추출

수문시계열자료를 통한 극치수문량 해석의 방법론으로 현재까지는 연최대치계열(annual maxima series)의 사용이 대부분이었으나 수문자료가 갖는 계절적 특성이나 수자원관리의 이수 측면에서 부분기간치계열(partial duration series)의 활용이 필요하다. 이러한 수문자료의 적용을 위해서는 POT 분석을 실시하여야 하며 일정 기준값(threshold) 이상의 자료를 모두 채택하여 수문자료해석에 활용할 수 있다. Madsen et al. (1997a; 1997b)에 의하면 임계값 이상의 자료를 모두 선택하여 빈도해석에 이용

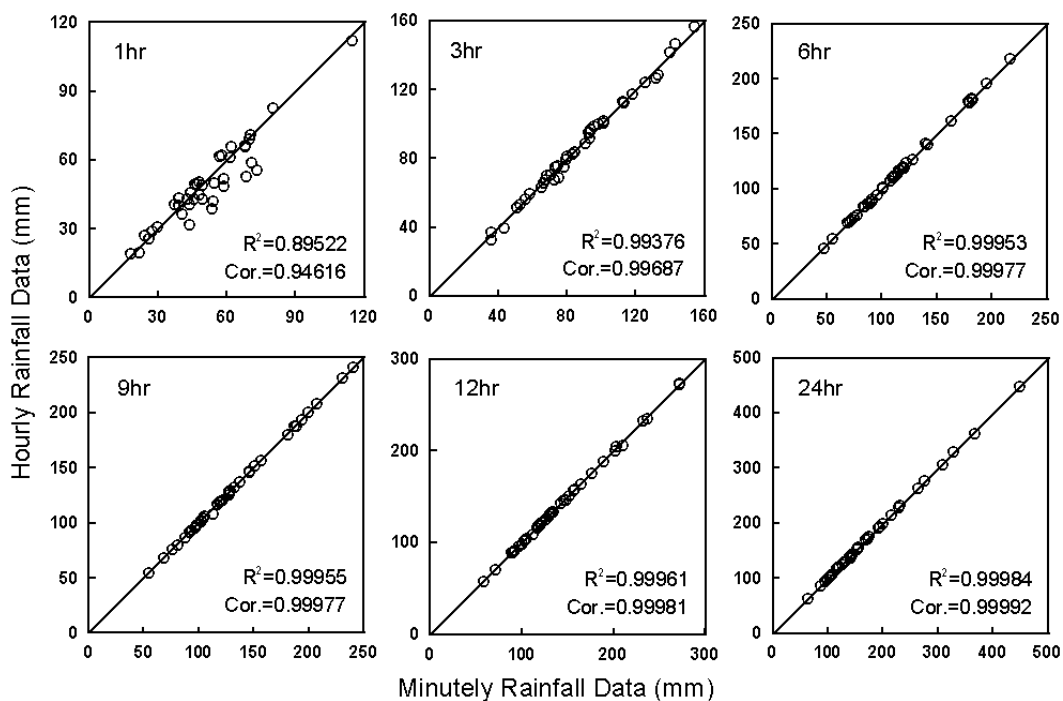


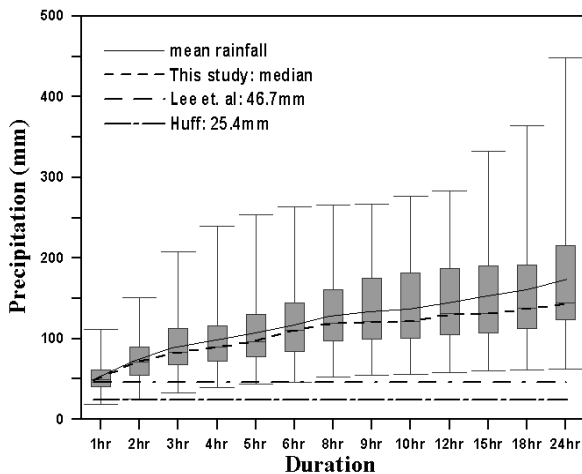
Fig. 1. Correlation between Minutely and Hourly Data for Each Rainfall Duration

할 경우 확률분포형의 Upper tail의 정보를 보다 명확히 할 수 있으며 극치분포의 매개변수와 Quantile을 적절히 추정할 수 있다고 연구한 바 있으며, 국내의 경우 노재경과 이길준(1992)은 단기간 기록년수의 자료에서 유용한 부분기간치계열 방법에 의한 POT모형이 연최대치계열방법 보다 효과적임을 판명하였다. 그러나 POT계열 구축을 통한 극치값분석에 있어 임계값의 결정은 매우 중요한 사항중 하나이며 Clarke et al. (2009)에 의하면 국부적인 최소값(local minima)에 대한 부분적인 결측구간의 보완과 오류를 방지하기 위하여 임계값의 선택에 있어 신중할 필요가 있다고 알려져 있다. 국내의 경우 엄명진 등(2008)의 연구사례에 의해서도 관측소의 상이한 강우의 분포형태로 인해 일반적으로 적정한 임계값의 크기가 얼마인지 결정하기가 어려운 문제라고 지적하고 있다. 또한, 이정주 등(2010)의 연구에 의하면 서울지점 시단위 강우자료를 대상으로 전기간 강우량 계열의 상위 98% (46.7 mm)에 해당하는 값으로 GEV분포형을 가정하고 적합성을 검토한 후 연구에 이용한다.

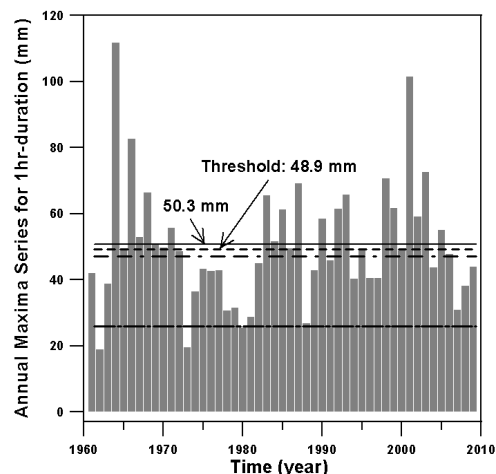
기존의 POT계열에 대한 연구는 대부분 최대홍수량자료 및 극치강우량자료를 통한 빈도해석 등에 적용되어왔으나, 본 연구에서는 부분기간치계열의 임계값을 초과하는 지속기간별 실강우 사상을 추출하여 최빈분위에 대한 시간분포형 개발에 활용하고자 한다. 이는 뚜렷한 연주기성(annual cycle)을 갖는 우리나라의 강우분포특성을 고려할 때 부분 기간치 계열의 임계값을 적용한 수문자료 해석은 보다 신뢰성 있는 방법이라 판단된다. 따라서 본 연구에서는 우리나라의 홍수기에 해당하는 JJAS (June to September) 계절에 대하여 부분기간치 계열에 대한 분

단위 강우량 자료를 활용하여 서울지점을 대상으로 관측 시작년도(1961년)부터 최근(2009년)까지 49개년의 자료로부터 지속기간별 임계값 이상의 호우사상을 추출하였다. 독립된 강우사상의 구분은 임계값이상의 강우가 지속될 때 임의지속기간을 겹치지 않는 범위 내에서 결정하였으며, 강우사상의 지속기간별 임계값의 적용은 구축된 연최대치 자료의 Quartile 50%에 해당하는 중앙값(median)으로 결정하였다.

본 연구에서 채택한 POT계열 추출을 위한 연최대치자료의 median rainfall의 적용에 있어 기존 Huff (1967)와 국토해양부(2000), 이정주 등(2010)의 연구와 비교할 때, 다른 점은 크게 세 가지로 구분하여 설명 할 수 있다. 첫 번째로, Fig. 2에서 보는바와 같이 모든 지속기간에 동일하게 특정기준치(Huff의 경우 1 inch=25.4 mm) 이상의 강우를 초과하는 호우사상을 선택하는 것이 아니라 지속기간별 호우사상의 추출기준을 달리 적용 했다는 점에 있다. 이는 지속기간별 실강우패턴에 맞게 시간분포가 달리 적용될 수 있어 Huff의 시간분포의 가장 큰 문제점 중에 하나인 지속기간에 따른 시간분포 특성의 변화를 반영하지 못한다는 단점을 보완할 수 있다. 또한 강우의 지속기간이 길어짐에 따라 발생할 수 있는 시간분포 특성의 평활된 값의 추출을 피할 수 있어 선택 강우의 중호우 사상 특성을 보다 효과적으로 반영할 수 있다. 두 번째로 연최대치 계열의 Quartile 50%에 해당하는 극치 수문사상을 고려한 POT계열의 추출이며 Fig. 2에서 보는바와 같이 Huff 방법에서 적용한 점우량에 비하여 중호우사상(heavy rainfall event)에 근접한 값을 채택할 수 있어 보다 극치강우(extreme rainfall)특성에 가까운 시간분포모형의 접근이 가능



(a) Distribution of hourly rainfall



(b) Time series of annual maxima

Fig. 2. Long Term Properties of Annual Maximum Rainfall

Table 1. POT Values Corresponding to Each Rainfall Duration

Division	Threshold in each rainfall duration (mm)							Remark
	1 hr	2 hr	3 hr	4 hr	5 hr	6 hr	12 hr	
Huff (1967)	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	
Lee et al. (2010)	46.7	46.7	46.7	46.7	46.7	46.7	46.7	
Mean	50.3	73.5	89.2	98.4	107.0	116.7	145.4	
Median	48.9	71.1	82.9	89.9	96.9	110.6	131.0	Applied in this study
POT Events	38	33	36	37	38	35	37	

하다. 이는 최근 자료의 관측 기간이 Huff (1967)의 연구에 비하여 상당부분 길어짐으로 인하여 중앙치 강우(median rainfall)를 임계값으로 적용하더라도 대표값(representative value)을 추출하기위한 선택 호우사상이 충분히 크기 때문이다. 마지막으로 매년 관측된 자료의 추가 시 가변 가능한 임계값을 적용할 수 있다는 점이며, 이는 최근 기상특성을 반영한 정형화되지 않은 극치호우사상 추출을 기대할 수 있다는데 그 의미가 있다. 다음 Fig. 2(a)는 1961년부터 2009년까지의 서울지점 연최대치 계열에 대한 임계값 적용을 위해 지속기간별 Box-Whisker plot을 실시하여 기존 연구와 비교하여 나타내었으며, Fig. 2(b)의 경우 적용 임계값의 크기를 실제 연최대치 자료와 비교하여 나타내었다. 또한 Table 1은 본 연구에서 임계값으로 적용한 지속기간별 임계값 기존의 연구와 비교하여 나타내었으며 POT 계열의 추출결과 강우지속기간별로 약 33~38개의 호우사상이 채택되었다.

3. 최적 시간분포 모형 개발

Huff 방법의 경우 동일한 분위에 대하여 강우지속기간에 상관없이 하나의 무차원 누가곡선만을 제시하게 되므로 강우지속기간에 따른 강우분포의 특성이 고려되지 못한다. 또한, 무차원 누가곡선의 경우 전 지속기간에 대하여 작성된 결과로서 단기간 호우의 경우 Yen and Chow (1977) 방법에 나타난 문제점처럼 실제 강우량과는 달리 첨두강우량을 높게 표현할 수 없어 소규모 유역의 경우 첨두홍수량이 작게 산정되는 문제점이 발생한다. 실제로 Ward et al. (1980), Knapp and Terstriep (1981)의 연구에 의하면 Huff의 방법은 시간분포 모형에 따라 첨두유출량이 약 30%의 차이가 있을 수 있으며, 다른 방법에 비하여 가능최대 강수량과 100년 빈도 홍수량이 약 20~25% 작게 산정될 수 있음을 보였다. 그 밖에도, 어떤 분위기를 선택하느냐에 따라 첨두홍수량의 차이가 많이 발생하므로 유역

에 맞는 적합한 최빈분위(the most frequency quartile)를 선택해야하는 문제가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 기존의 Huff의 4분위법에 의한 시간분포의 문제점을 극복하고자 지속기간별로 추출된 분단위 강우자료를 바탕으로 순위 결정에 의한 가중치를 부여하는 방식으로 최빈분위를 선정하고 선정된 호우사상에 핵밀도함수 추정법을 적용하여 시간분포 곡선을 유도하는 방법을 제시하고자 한다.

3.1 순위 결정에 의한 최빈분위 선정

강우자료의 POT계열에 대한 Quartile별 최빈분위 결정과 극치강우사상에 대한 가중치(weighting) 부여를 위하여 다음과 같은 방법을 사용하였다. 먼저 선택된 POT 계열의 강우총량을 크기순으로 나열한 후 순위(ranking)를 결정한 후 결정된 순위에 따라 호우사상을 구분하여 1번부터 차례대로 Numbering을 실시하였다. 이후 순위가 결정된 호우사상을 선택분위별로 다시 구분하여 분류하고 순위가 높은 호우사상 별로 가중치를 부여한 후 발생확률이 가장 높은 Quartile을 최빈분위로 선정하였다. 본 연구에서 사용한 최빈분위 선정식을 다음 Eqs. (1)~(2)와 같이 간략히 정리할 수 있다.

$$W_i = \sum_{i=1}^4 \{(P_i + 1) - R_i\} \quad (1)$$

$$QT_i = \frac{W_i}{T} \times 100 (\%) \quad (2)$$

여기서, W_i 는 각 분위별 가중치, P_i 는 분위별 POT계열의 수, R_i 는 순위(ranking), QT_i 는 가중치부여 후 분위별 발생확률, T 는 가중치의 합($T = W_1 + W_2 + W_3 + W_4$), $i = 1, 2, 3, 4$ 이다.

다음 Table 2는 강우의 지속기간별 순위결정에 의한 가중치 부여 전의 최빈분위 선정결과이다. 지속기간별로 최빈분위는 2분위(2nd quartile) 분포가 지배적인 것으로

Table 2. Result of Selection for the Mode Quartile Storms before Weighting

Duration (hr)	1 st Quartile		2 nd Quartile		3 rd Quartile		4 th Quartile		Select
	P_i	%	P_i	%	P_i	%	P_i	%	
1	9	23.7	8	21.1	9	23.7	12	31.6	4 th
2	8	24.2	10	30.3	9	27.3	6	18.2	2 nd
3	9	25.0	14	38.9	5	13.9	8	22.2	2 nd
4	12	32.4	12	32.4	9	24.3	4	10.8	1 st /2 nd
5	10	23.6	11	28.9	7	18.4	10	26.3	2 nd
6	6	17.1	11	31.4	7	20.0	11	31.4	2 nd /4 th
12	12	32.4	12	32.4	9	24.3	4	10.8	1 st /2 nd

Table 3. Result of Selection for the Mode Quartile Storms after Weighting

Duration (hr)	1 st Quartile		2 nd Quartile		3 rd Quartile		4 th Quartile		Select
	W_i	QT_i	W_i	QT_i	W_i	QT_i	W_i	QT_i	
1	183	24.7	179	24.2	164	22.1	215	29.0	4 th
2	135	24.1	163	24.2	182	32.4	108	19.3	3 rd
3	140	21.0	196	29.4	124	18.6	206	30.9	4 th
4	147	20.9	258	36.7	200	28.4	98	13.9	2 nd
5	157	21.2	235	31.7	130	17.5	219	29.6	2 nd
6	95	15.1	200	31.7	100	15.9	235	37.3	4 th
12	107	15.4	41	5.9	298	42.8	251	36.0	3 rd

나타났으나 지속기간 4, 6, 12 hr와 같이 각 분위별로 동일한 호우수가 선정될 때는 최빈분위 선정에 어려움이 있다. 또한 다음 Table 3은 강우의 지속기간별 순위결정에 의한 가중치 부여 후의 최빈분위 선정결과이다. 가중치 (W_i)를 부여하기 전에 비하여 가중치를 부여한 후의 분위별 백분율(QT_i)이 보다 다양하게 산정되어 최빈분위 선정의 어려움이 해소되었다. 중호우 사상의 순위별로 가중치를 부여한 결과 가중치 부여 전에 비하여 3rd~4th 분위의 분포가 증가하였고 지속기간별 최빈분위는 4분위 (4th quartile) 분포로 나타났다.

3.2 IQR Matrix 적용

본 연구에서는 최빈 호우사상 강우자료 계열에 대하여 IQR (interquartile range) Matrix를 적용하여 호우사상을 추출하는 방법을 제안하고자 한다. IQR은 Quartile의 적용시 1사분위수와 3사분위수의 차를 의미한다. 주어진 자료를 크기순서로 배열하였을 때 중앙치는 한 가운데에 위

치하는 자료를 말한다. 그런데 한 가운데가 아닌 다른 상대적 위치(relative position)에 있는 자료를 알고자 하는 경우가 있는데 이때 사용하는 개념이 사분위수(quartile)와 백분위수(percentile)이다. 백분위수란 자료를 크기순서로 정리하여 백등분하였을 때 각 등분점에 위치하는 자료를 말한다. 백분위수를 말할 때는 보통 10번째 백분위수라든가 50번째 백분위수 등으로 표현하는데 10번째 백분위수란 순서대로 배열된 자료를 10등분한 수 앞에서 10번째 위치에 있는 자료를 말한다. P 번째 100분위수는 자료를 두 그룹으로 나누는 값을 말하는데 이렇게 하면 자료들의 약 $P\%$ 는 P 번째 100분위수보다 작거나 같은 값들을 나타내고 자료들의 $(100-P)\%$ 는 크거나 같은 값들을 나타낸다. P 번째 백분위수는 자료를 작은 것부터 큰 순서로 배열한 후 지수 i 를 다음 Eq. (3)과 같이 계산함으로 구할 수 있다.

$$i = \left(\frac{P}{100} \right) \times n \quad (3)$$

여기서, P 는 관심 있는 백분위 수이고, n 은 자료의 수이다.

만일 i 가 정수가 아니면 i 보다 큰 가장 가까운 정수를 정한다. 이것이 P 번째 백분위수의 위치이다. 만일 i 가 정수이면 P 번째 백분위수는 i 와 $(i+1)$ 의 위치에 있는 자료를 평균한 것이 된다. Quartile은 총 4개의 구간으로서 1사분위수(first quartile)는 자료의 최소치부터 25번째 백분위수까지를, 2사분위수(second quartile) 또는 중앙치는 자료의 25번째 백분위수 부터 50번째 백분위수까지를, 3사분위수(third quartile)는 자료의 50번째 백분위수 부터 75번째 백분위수까지를, 나머지 4사분위수(fourth quartile)는 75번째 백분위수 부터 최대값까지를 의미한다. 또한 백분위 수의 적용은 IQR을 산정한 후 강우자료가 적당히 분포될 수 있도록 시간간격을 총 9개의 구간으로 구분하여 추출된 강우자료의 최대침투(percentile 75)를 Quartile별로 위치시켜 5% 구간의 백분위수의 값을 재배열하여 사용하였다. 본 연구에서 적용한 IQR matrix는 다음 Table 4와 같다.

추출된 분단위 강우자료를 4개의 그룹으로 분류하여 Table 4의 IQR matrix를 적용한 후 강우지속기간(rainfall duration)별 우량주상도(rainfall hyetograph)를 산출해 내었다. 산출된 실강우 패턴의 우량주상도에 설계강우를 분단위로 시간분포 시켜 유출분석에 직접 활용이 가능하나 이는 일반화 되지 않은 분포특성으로 인한 실무 적용에 어려움이 따른다. 따라서 실제 유역을 대표할 수 있는 일반화된 시간분포형을 유도해 내기 위하여 다양한 방법의 Regression식이나 smoothing기법이 적용되어 질 수 있다. 본 연구에서는 먼저 추출된 우량주상도를 무차원화한 후 이를 축차적으로 더해서 누가시킨 후 누가강우량에 대한 고차 다항식(polynomial regression)을 적합(fitting)

하는 방법을 사용하여 일반화된 우량주상도의 분포형태를 추정하는 방법을 사용하였다.

강우를 시간적으로 무차원화 시키기 위하여 개개 강우의 누가지속기간에 따른 강우량을 각각 백분율로 표시하고, 이를 식으로 나타내면 다음 Eq. (4)와 같다.

$$DR(i) = \frac{R(i)}{\sum_{n=1}^t R(n)} \times 100 \% \quad (4)$$

여기서, $DR(i)$ 는 임의시간 $t(i)$ 에서의 강우량 비이며, i 는 단위증분횟수로 여기서는 1분 간격을 의미한다. 또한 $R(i)$ 는 임의시간 $t(i)$ 까지의 누가우량이며, $\sum_{n=1}^t R(n)$ 은 임의의 지속기간 $t(n)$ 까지의 총 우량이다.

고차다항식을 통한 무차원 강우의 적합결과 6차 다항식에 의한 결과가 통계적으로 가장 유의한 결과를 보여 일반화된 6차 다항식을 사용하였으며, 각 구간의 무차원 누가강우곡선(dimensionless cumulative rainfall curve)에 대하여 다항회귀 방정식을 이용한 회귀분석(regression analysis)을 실시하여 적합한 고차다항식은 다음 Eq. (5)와 같다.

$$Y = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3 + c_4 x^4 + c_5 x^5 + c_6 x^6 \quad (5)$$

여기서, Y 는 강우량이며, x 는 강우의 지속기간, $c_0, c_1, c_2, \dots, c_6$ 는 6차 다항식의 상수이다.

본 연구에서는 원자료와 적합식과의 관계를 RSS (residual sum of squares)와 R^2 (coefficient of determination)를 산정해 봄으로서 무차원식의 적합성을 평가하였다. 강우의 지속기간과 Quartile별 RSS와 R^2 를 산정한 결과 적합식과 무차원 누가곡선이 매우 높은 상관성을 보임을 알 수 있었으며 특히 강우지속 1시간분포의 경우

Table 4. Application to the IQR Matrix for Mode Quartile Event

Division	1 st Quartile (0~25%)	2 nd Quartile (25~50%)	3 rd Quartile (50~75%)	4 th Quartile (75~100%)
1 st	Percentile 65	Percentile 50	Percentile 35	Percentile 35
2 nd	Percentile 75	Percentile 60	Percentile 40	Percentile 40
3 rd	Percentile 70	Percentile 70	Percentile 45	Percentile 45
4 th	Percentile 60	Percentile 75	Percentile 55	Percentile 50
5 th	Percentile 55	Percentile 65	Percentile 65	Percentile 55
6 th	Percentile 50	Percentile 55	Percentile 75	Percentile 60
7 th	Percentile 45	Percentile 45	Percentile 70	Percentile 70
8 th	Percentile 40	Percentile 40	Percentile 60	Percentile 75
9 th	Percentile 35	Percentile 35	Percentile 50	Percentile 65

RSS는 0.0013~0.0043로, R^2 는 0.9992~0.9997로 산정되었다. 다음 Fig. 3는 IQR matrix를 적용하여 산정한 누가강우량의 Quartile별 무차원 누가곡선을 적합한 결과이며, 다음 Table 5에서는 강우지속기간 1시간의 실강우패턴의 4구간

분포의 6차원 무차식의 50% 계수값을 산정하여 나타내었다.

다음 Fig. 4는 IQR matrix를 이용하여 산출한 강우지속기간 1시간의 4구간별 단위우량주상도(unit rainfall hyetograph)를 6차원 다항식에 의해 강우분포형태를 추

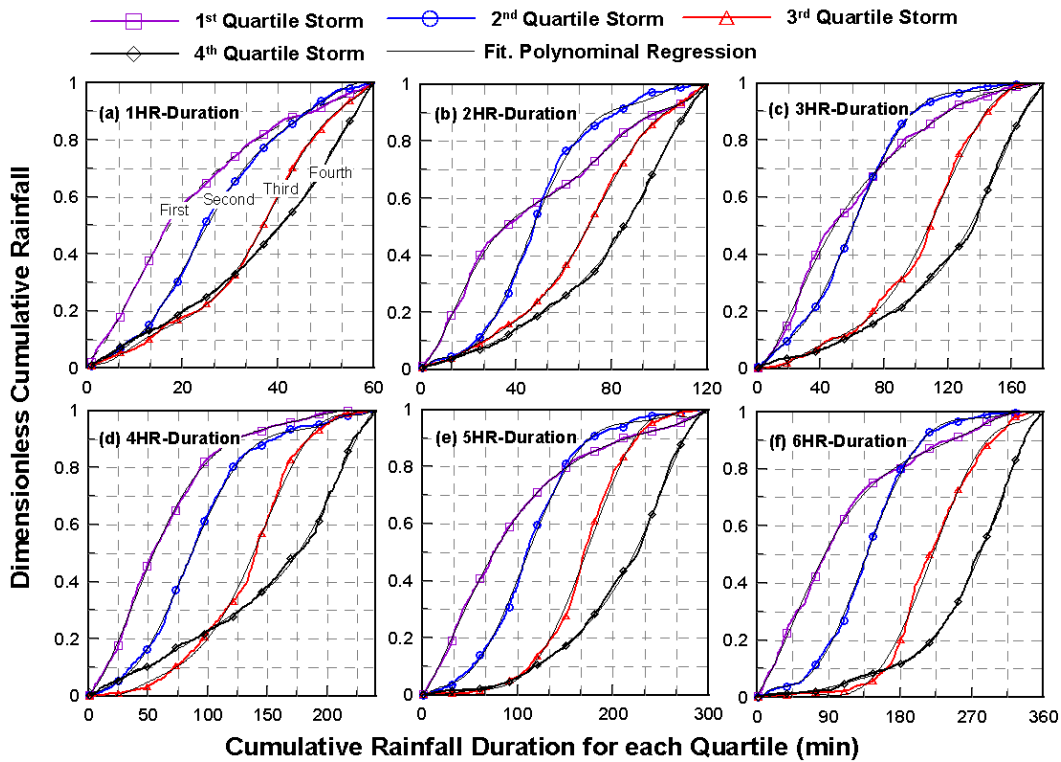


Fig. 3. Fitting Curves of Dimensionless Cumulative Rainfall for Each Quartile Rainfall to Application of IQR Matrix

Table 5. Coefficients of 6th Dimensionless Equation for Fourth-section of Rainfall Distribution Patterns (1 hr-Duration)

Coeff.	1 st Quartile, 50%	2 nd Quartile, 50%	3 rd Quartile, 50%	4 th Quartile, 50%
c0	0.026916	-0.0059	0.034993	-0.00917
c1	0.007895	0.015563	-0.01668	0.017048
c2	0.003416	-0.00202	0.004406	-0.00106
c3	-0.00021	0.000222	-0.00032	6.16E-05
c4	5.65E-06	-7.96E-06	1.09E-05	-1.73E-06
c5	-7.31E-08	1.20E-07	-1.65E-07	2.50E-08
c6	3.69E-10	-6.63E-10	9.15E-10	-1.42E-10
RSS	0.0037804	0.00428032	0.00305073	0.00130558
R^2	0.999226	0.999401	0.999541	0.999731

* $RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2$, where y_i is the i^{th} value of the variable to be predicted, x_i is the i^{th} value of the explanatory variable, and $f(x_i)$ is the predicted value of y_i , $R^2 = 1 - SS_{err}/SS_{tot}$, where $SS_{tot} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2$ is total sum of squares, $SS_{err} = \sum_i (y_i - f_i)^2$ is residual sum of squares.

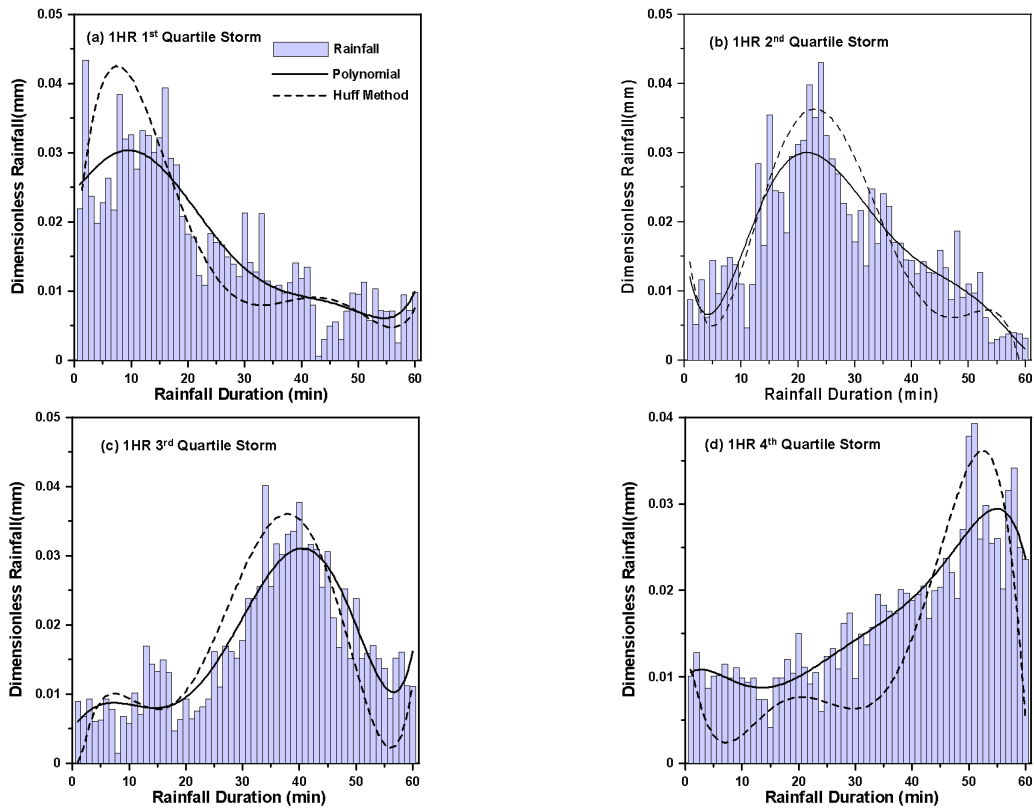


Fig. 4. Dimensionless Unit Rainfall Hyetograph in Each Quartile (1hr-Duration)

정한 결과와 Huff (1967) 방법에 의한 단위우량 추상도를 작성한 결과를 비교하여 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 다항식에 의한 회귀곡선의 산정 방법은 실강우 패턴에 적합한 다양한 형태의 시간분포형이 추출될 수 있으나 첨두 강우의 형태 왜곡으로 인한 실제 극치강우패턴을 제대로 반영하지 못할 우려가 있을 것으로 판단된다. 또한 설계강우는 우량추상도의 분포형태에 따라 유역의 유역응답에 영향을 미칠 수 있어 유출분석 시 신중을 기해야 할 것이다. 관측자료와 추정된 자료의 첨두치의 차이를 평가하기 위하여 먼저 첨두값의 퍼센트 오차(PEP: percent error in peak)를 사용하였으며 PEP의 계산식은 다음 Eq. (6)과 같다.

$$PEP = \frac{est_i - obs_i}{est_i} \times 100 \quad (6)$$

여기서, i 는 임의의 지속기간동안 강우의 단위 증분횟수이다. 또한 est_i 는 단위증분횟수 i 동안에 추정된 강우이며, obs_i 는 단위증분횟수 i 동안 관측된 실강우를 의미한다.

첨두값은 수문자료의 중요한 사상형으로 이용될 수 있으며, 첨두값의 퍼센트 오차가 음수이면 모의된 첨두값이 더 작음을 의미한다. 이는 무차원계수이며 첨두값의 발생

시각이 고려되지 않는 단점이 있다. 다음 Table 6에서 보는바와 같이 Quartile별로 첨두값의 퍼센트 오차를 분석한 결과 Polynomial regression의 경우 PEP는 -22.5~ -29.9%의 범위에 있었으며, 상관계수는 0.8687~0.9031, R^2 는 0.7547~0.8156으로 나타났다. 또한 Huff method의 경우 PEP는 -2.5~-15.6%의 범위에 있었으며, 상관계수는 0.8164~0.8464, R^2 는 0.6664~0.7164로 나타났다. 따라서 실강우자료에 대한 직접적인 다항식 적용에 의한 시간분포형 유도는 첨두 강우의 형태 왜곡 등으로 인한 극치강우를 제대로 반영하지 못할 우려가 있어 실강우 패턴과 극치강우의 형태를 반영할 수 있는 시간분포형의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

3.3 Kernel Approach

조사대상이 되는 모집단 분포에 관한 정보가 부족할 경우와 어떠한 분포특성에 대한 가정이 곤란한 경우, 부정확한 가정을 전제로 하지 않고 통계량을 분석하여 통계적 추론을 하는 방법이 필요하게 되며, 최종적으로 하나의 분포함수를 객관적으로 선택하게 된다. 이를 위하여 가장 일반적으로 적용할 수 있는 방법이 핵함수(kernel function)이다. 일반적으로 핵함수는 Gaussian, Rectangular,

Table 6. Result of Percent Error in Peak (PEP) for Each Quartile (1hr-Duration)

Quartile	Polynomial regression			Huff method		
	CC	PEP	R ²	CC	PEP	R ²
1st	0.8711	-29.8%	0.7692	0.8268	-2.5%	0.6837
2nd	0.8687	-29.9%	0.7547	0.8464	-15.6%	0.7164
3rd	0.8984	-22.5%	0.8071	0.8298	-10.4%	0.6885
4th	0.9031	-24.8%	0.8156	0.8164	-4.9%	0.6664

* CC is correlation coefficient: $(\sum obs_i - est_i/n) - (\sum obs_i/n) \times (\sum est_i/n) / \sqrt{SD_1 \times SD_2}$, PEP is percent error in peak, R² is coefficient of determination.

Epanechnikov 및 Cauchy 등이 많이 사용되고 있다. 핵함수는 $t=0$ 에서 최대치를 갖고 연속이며 방정식의 형태가 대칭적이다. 다음 Eqs. (7)~(9)에서 보는바와 같이 핵함수의 면적은 1이고 기댓값($E(t)=0$)은 영이며 유한한 분산($Var(t) = const.$)을 갖는 특징이 있다.

$$\int K(t)dt = 1 \tag{7}$$

$$E(t) = \int tK(t)dx = 0 \tag{8}$$

$$Var(t) = \int (t - \mu)^2 K(t)dx = const. \tag{9}$$

여기서, $t = (x - X_i) / h$ 이고, 이 때 x 는 임의의 점이고, X_i 는 실제 관측된 자료이다.

짧은 기록의 자료와 왜곡된 자료에 대한 매개변수의 신뢰성 결여와 그 외에 여러 가지 원인으로 인해서 복합분포(mixed distribution)의 밀도함수를 가진 자료를 표현하고 자할 때 기존의 확률분포 추정방법으로는 어려움이 따른다. 따라서 이런 경우 핵밀도함수(kernel density function) 방법을 적용하면 원자료의 특성을 최대한 살리면서 상당부분 좋은 결과를 얻어낼 수 있다(Lall et al., 1993; Moon and Lall, 1994). 일반적으로 핵밀도함수 추정식은 모든 실수 x 에 대하여 다음 Eq. (10)과 같이 정의할 수 있다.

$$\hat{f}_h(x) = n^{-1} \sum_{i=1}^n h^{-1} K\{h^{-1}(x - X_i)\} \tag{10}$$

여기서, $K(\bullet)$ 는 핵함수이며, n 은 자료의 개수, x 는 임의의 실수, $X_i = X_1, X_2, \dots, X_n$ 은 독립적으로 분포된 실 관측치, h 는 n 이 무한대로 갈 때 영(zero)으로 접근하는 값($n \rightarrow \infty, h = h(n) \rightarrow 0$)을 갖는 양의 광역폭(bandwidth)이다.

핵밀도함수법에서 광역폭 h 의 선택은 매우 중요한 문제이며, h 의 값은 핵함수 추정법에 있어서 매우 중요하지만 실제로는 정확하게 구하기가 쉽지 않다. 본 연구에서 적용한 광역폭의 결정은 Solve the equation plug in (SJPI) 방

법을 사용하였으며, 이 방법은 기준이 되는 미지의 $R(\hat{f}_h)$ 의 추정치를 산정하여 최적의 광역폭을 결정하는 방법으로 Sheather and Jones (1991)에 의해 다음과 같은 Eq. (11)과 같이 제시되었다.

$$h = \left[\frac{R(K)}{nR(\hat{f}_{g(h)}) \left(\int x^2 K(x)dx \right)^2} \right] \tag{11}$$

여기서, h 는 광역폭이며, n 은 자료의 개수, x 는 임의의 실수, $K(\bullet)$ 는 핵밀도함수, $R(\bullet)$ 는 최적의 광역폭 결정을 위한 미지의 추정치를 의미한다.

3.4 극치강우의 시간분포 모형개발

핵밀도함수에 의한 해석방법은 어떤 분포의 가정이 필요 없이 관측자료 자체에서 분포형을 유도할 수 있기 때문에 분포형 선정의 어려움을 해소할 수 있는 장점이 있다. 따라서 항상 일관성을 가지고 적정한 분포형을 제시해주는 핵밀도함수에 의한 해석방법이 실강우 자료에 대한 분포특성을 유도하는데 보다 유리할 수 있으므로 본 연구에서 극치강우의 Kernel Approach를 통한 분단위 강우자료의 시간분포 모형개발에 적용하였다. 또한 앞에서 언급하였듯이 핵밀도함수법에 있어 광역폭 h 의 선택은 중요한 문제이며 적절한 광역폭의 선정이 강우의 시간분포형을 결정하는데 영향을 미칠 수 있다. 너무 큰 h 는 큰 편차(bias)와 너무 원만(oversmooth)한 밀도함수의 추정과 정보의 손실을 가져오는 반면에, 너무 작은 h 는 큰 분산(variance)과 비정상적인 확률밀도함수 추정치를 나타낸다(Adamowski and Labatiuk, 1987). 따라서 본 연구에서는 광역폭 결정의 기준이 되는 분포함수의 Shape으로 일반적으로 자료의 선형 추세분석과 Smoothing 기법에 많이 사용되고 있는 Friedman super smoother method (Venables and Ripley, 2000)의 결과와 비교하여 광역폭 h 를 적절히 조절하여 최적의 값을 결정하였다.

강우의 Quartile과 지속기간에 따라 구분한 우량주상에 Kernel approach를 통하여 산정한 강우의 시간분포형은 다음 Fig. 5와 같으며 이를 Huff (1967)의 결과와 비교하여 나타내었다. Fig. 5에서 보는바와 같이 Kernel approach에 의한 극치강우의 시간분포 추정방법은 지속기간별로 각기 다른 형태의 분포형을 갖는 것을 확인할 수 있어 기존 Huff (1967) 방법에서의 최대 문제점 중에 하나인 지속기간별 시간분포 변화 특성을 고려하지 못한다는 점을 보완하였다. 따라서 강우의 시간분포형을 결정하는데 있어 Kernel approach를 적용한다면 강우의 지속기간별로 정형화된 형태의 시간분포형의 적용을 배제하고 실강우 패턴에 근사한 강우의 시간분포형을 추출해 낼 수 있음을 알 수 있다.

또한, 본 연구에서는 몇 가지 통계적 방법을 사용하여 실강우 패턴과 유도된 강우의 시간분포형의 신뢰도를 정량적으로 평가하고자 하였다. 통계적 평가방법은 실강우 패턴과의 평균적인 추정 오차를 확인하기 위하여 평균추정오차(MES: mean estimation error)를 사용하였다. 또한, 첨두값에 가중치를 둔 첨두-가중평균제곱근오차(PW-RMSE: peak-weighted root mean square error) 방법을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 강우의 시간분포형의 적합성을 평가하기 위한 관측치와 추정치의 통계적 평가의 계산식은 다음 Eqs. (12) and (13)과 같다.

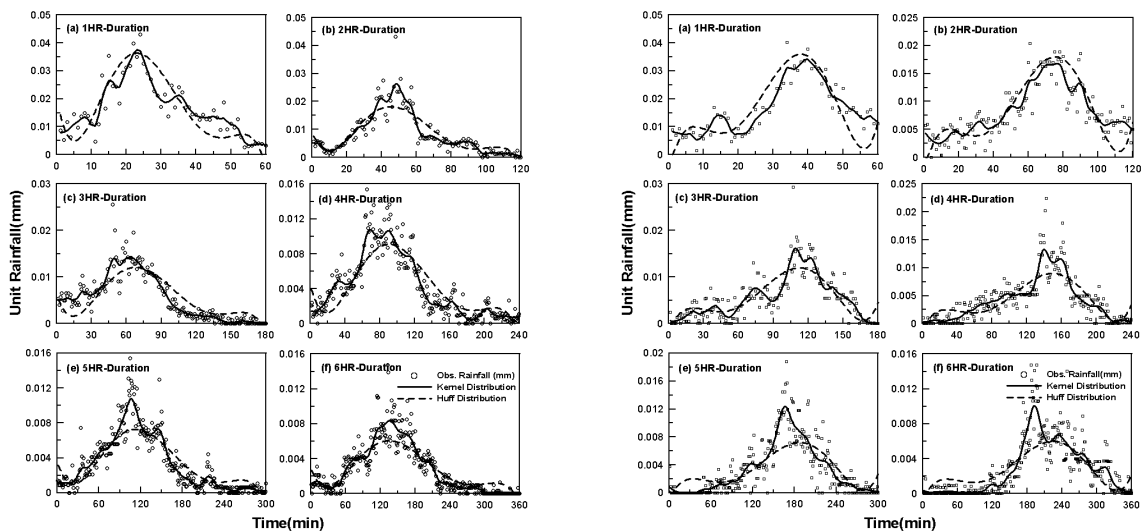
$$\xi_1 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{est_i - obs_i}{obs_i} \right)}{n} \right] \times 100 \quad (12)$$

$$\xi_2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ (obs_i - est_i)^2 \times \frac{(obs_i + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n obs_i)}{2 \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n obs_i} \right\}} \quad (13)$$

여기서, ξ_1 은 평균 추정오차(MES)의 백분위 값이며, ξ_2 는 첨두-가중평균제곱근오차(PW-RMSE)이다. 또한 i 는 임의의 지속기간동안 강우의 단위 증분횟수, n 은 강우의 지속기간이며, est_i 는 단위증분횟수 i 동안에 추정된 강우, obs_i 는 단위증분횟수 i 동안 관측된 강우를 의미한다.

다음 Table 7은 실강우 패턴과 유도된 강우의 시간분포형의 지속기간별 통계적 평가 결과이다.

실강우 패턴과 유도된 시간분포형의 통계적 평가결과 Kernel 방법의 경우 지속기간별 관측치와의 상관계수는 0.8235~0.9603으로, 결정계수(R^2)는 0.6785~0.9223으로 산정되었으며, 평균추정오차의 백분위 값은 3.4~104.4%의 범위로, 첨두-가중평균제곱근오차는 1.38E-06~5.56E-05로 분석되었다. Huff방법의 경우 지속기간별 관측치와의 상관계수(CC)는 0.7191~0.9737로, 결정계수(R^2)는 0.5171~0.9481로 산정되었으며, 평균추정오차의 백분위 값은 4.4~152.9%의 범위로, 첨두-가중평균제곱근오차는 1.16E-06~1.04E-04로 분석되었다. 실강우 패턴과 유도된 시간분포형의 MES와 PW-RMSE를 평가한 결과를 종합하여보면 Kernel approach에 의한 방법이 Huff에 의한 방법에 비하여 평균적으로 R^2 는 13.4~15.2% 높게 나타났다. MES는 평균 24.8~39.5% 작게 산정되었고, PW-RMSE의 경우 평균 1.13E-05 정도 작게 산정되었다.



(a) Derivation of 2nd Quartile Distribution

(b) Derivation of 3rd Quartile Distribution

Fig. 5. Comparison of Time Distribution between Kernel Approach and Huff Method

Table 7. Results of Statistical Analysis on Kernel Approach and Huff Method

Duration (hr)	Kernel Approach			Huff Method			Note
	ξ_1	ξ_2	R^2	ξ_1	ξ_2	R^2	
1	6.2%	5.56E-05	0.9018	4.4%	1.04E-04	0.7164	2-ND
	6.9%	4.73E-05	0.9223	10.9%	1.04E-04	0.6885	3-RD
2	11.2%	3.02E-05	0.8963	40.4%	4.65E-05	0.7572	2-ND
	13.4%	1.77E-05	0.8273	13.5%	2.61E-05	0.6902	3-RD
3	3.4%	1.23E-05	0.8941	33.1%	1.93E-05	0.6904	2-ND
	17.0%	1.47E-05	0.8264	32.5%	2.09E-05	0.6258	3-RD
4	9.6%	5.58E-06	0.9066	32.5%	9.00E-06	0.7389	2-ND
	23.8%	9.01E-06	0.8378	66.6%	1.38E-05	0.6512	3-RD
5	7.5%	4.33E-06	0.9018	37.3%	6.93E-06	0.7769	2-ND
	52.6%	6.56E-06	0.8324	128.1%	1.06E-05	0.6677	3-RD
6	104.4%	3.86E-06	0.8791	152.9%	5.34E-06	0.9481	2-ND
	15.4%	4.92E-06	0.8297	104.7%	4.41E-06	0.8007	3-RD
12	42.8%	1.42E-06	0.6782	42.8%	1.42E-06	0.5171	2-ND
	10.6%	1.13E-06	0.8649	59.7%	1.16E-06	0.7497	3-RD

* ξ_1 is mean estimation error (MES), ξ_2 is peak-weighted root mean square error (PW-RMSE), R^2 is coefficient of determination.

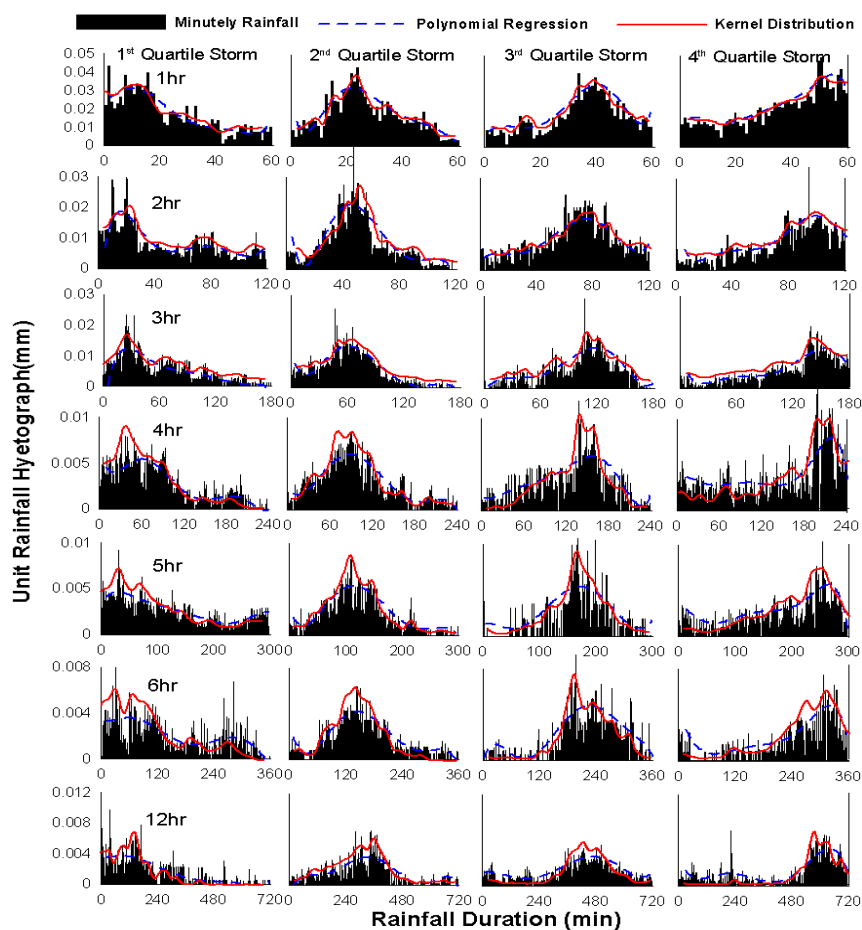


Fig. 6. Time Distribution Model of Extreme Rainfall Using Kernel Approach

통계분석결과 전반적으로 Kernel Approach에 의한 방법이 Huff에 의한 방법에 비하여 결정계수가 높고, 평균추정오차와 첨두-가중평균제곱근오차가 작게 산정됨으로 실강우 패턴의 강우량 평균과 첨두치를 보다 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 여러 선행 연구(Ward et al., 1980; Huff, 1986, 윤용남 등, 2004)에서도 지적하고 있는 도시하천과 같은 소규모 유역에서 Huff의 4분위법에 의

한 유출량 산정시 첨두홍수량이 작게 산정될 수 있다는 문제점을 보완할 수 있을 것으로 사료된다.

다음 Fig. 6은 Kernel approach를 통한 단위우량주상도(unit rainfall hyetograph)를 작성하여 각각의 Quartile별 우량주상도의 지속기간별 극치강우의 시간분포형을 유도한 결과이며, Table 8은 Kernel approach를 통하여 유도된 극치강우의 시간분포함수를 지속기간별로 추가시킨

Table 8. Development of Extreme Rainfall Time Distribution Model Using Kernel Distribution Function of Dimensionless Cumulative Curves

Duration (hr)	Coefficients of dimensionless rainfall for Kernel regression							Note
	0	1	2	3	4	5	6	
1	0.021099	0.011217	0.002924	-0.000180	4.84E-06	-6.20E-08	3.13E-10	1-ST
	-0.005650	0.015321	-0.001950	0.000216	-7.70E-06	1.17E-07	-6.40E-10	2-ND
	0.032947	-0.015620	0.004237	-0.000310	1.05E-05	-1.60E-07	8.88E-10	3-RD
	-0.007440	0.015742	-0.000860	4.92E-05	-1.35E-06	1.97E-08	-1.12E-10	4-TH
2	0.008321	0.005203	0.001158	-4.55E-05	7.25E-07	-5.23E-09	1.41E-11	1-ST
	-0.017140	0.015213	-0.001480	6.64E-05	-1.12E-06	8.17E-09	-2.20E-11	2-ND
	0.015531	-0.002970	0.000623	-2.43E-05	4.59E-07	-3.77E-09	1.11E-11	3-RD
	0.004850	0.002302	-3.79E-05	4.04E-06	-9.48E-08	9.87E-10	-3.57E-12	4-TH
3	-0.009460	0.004968	0.000366	-8.28E-06	7.90E-08	-3.58E-10	6.23E-13	1-ST
	-0.008680	0.009204	-0.000390	1.34E-05	-1.61E-07	8.14E-10	-1.49E-12	2-ND
	0.019333	-0.005370	0.000447	-1.10E-05	1.28E-07	-6.54E-10	1.21E-12	3-RD
	-0.005190	0.004563	-0.000210	5.66E-06	-6.67E-08	3.71E-10	-7.64E-13	4-TH
4	0.006315	0.003918	0.000213	-2.90E-06	1.52E-08	-3.51E-11	2.85E-14	1-ST
	-0.010680	0.004267	-0.000170	5.04E-06	-4.72E-08	1.81E-10	-2.51E-13	2-ND
	0.029568	-0.005580	0.000283	-5.14E-06	4.65E-08	-1.87E-10	2.72E-13	3-RD
	-0.007670	0.004344	-0.000110	2.09E-06	-1.85E-08	7.67E-11	-1.17E-13	4-TH
5	-0.004110	0.005476	6.17E-05	-8.91E-07	4.60E-09	-1.13E-11	1.12E-14	1-ST
	-0.015750	0.004416	-0.000170	3.43E-06	-2.42E-08	7.20E-11	-7.79E-14	2-ND
	0.008830	-0.001620	9.62E-05	-1.96E-06	1.77E-08	-6.42E-11	8.04E-14	3-RD
	-0.011380	0.002757	-9.54E-05	1.45E-06	-9.73E-09	3.15E-11	-3.85E-14	4-TH
6	0.015115	0.003661	6.80E-05	-7.07E-07	2.67E-09	-4.32E-12	2.36E-15	1-ST
	-0.019510	0.004935	-0.000160	2.46E-06	-1.37E-08	3.27E-11	-2.88E-14	2-ND
	-0.007240	0.000388	2.66E-05	-7.62E-07	6.56E-09	-2.05E-11	2.14E-14	3-RD
	0.006129	0.000175	-7.67E-06	2.26E-07	-1.91E-09	6.89E-12	-8.36E-15	4-TH
12	0.044182	0.000234	5.35E-05	-2.87E-07	6.43E-10	-6.74E-13	2.72E-16	1-ST
	-0.038670	0.002889	-3.25E-05	2.01E-07	-4.80E-10	4.92E-13	-1.82E-16	2-ND
	0.023721	-0.001400	3.44E-05	-2.66E-07	8.70E-10	-1.20E-12	5.87E-16	3-RD
	-0.024700	0.002047	-3.63E-05	2.56E-07	-8.12E-10	1.17E-12	-6.09E-16	4-TH

후 Kernel 분포함수의 무차원 누가곡선식에 고차다항식을 적합하여 Kernel 분포함수에 의한 시간분포 모형을 개발한 결과이다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 Huff (1967) 방법에서의 최대 문제점 중에 하나인 지속기간별 시간분포 변화 특성을 고려하지 못하는 점과 강우사상별 강우총량에 대한 기준강우량의 일괄적용 등의 문제점을 개선하고자 하였으며 정형화된 형태의 시간분포형의 적용과 소규모 구역에서 침투홍수량이 작게 산정되는 점을 보완하였다. 본 연구를 통하여 도출한 결론을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 분단위 관측자료를 60분 단위로 합성한 자료를 생성하여 이를 시간위 관측자료와 직접 비교한 결과 강우 지속 1hr에서 상관관계가 0.946로 나타났으며 나머지 모든 지속기간에서 상관관계가 0.997 이상으로 높게 나타나 분단위 관측자료의 활용성을 검증하였다.

둘째, 뚜렷한 연주기성을 갖는 우리나라의 강우분포특성을 고려할 때 POT계열의 임계값을 적용한 수문자료 해석은 보다 신뢰성 있는 방법이라 사료되며, 연최대치 계열의 Quartile 50%에 해당하는 극치 수문사상을 고려한 POT계열의 추출은 Huff 방법에서 적용한 점우량에 비하여 중호우사상에 근접한 값을 채택하였으며, 강우의 지속기간이 길어짐에 따라 발생할 수 있는 시간분포 특성의 평활된 값의 추출을 피할 수 있는 것으로 분석되었다.

셋째, 강우총량을 크기순으로 나열한 순위(rank) 결정에 따른 극치강우사상에 대한 가중치(weighting)를 부여한 결과, 가중치 부여 전에 비하여 3rd~4th quartile의 분포가 증가하였고 지속기간별 최빈분위는 4분위(4th quartile) 분포로 나타났다. 또한 최빈 호우사상 강우자료 계열에 대하여 IQR (interquartile range) matrix를 적용하여 호우사상을 추출하는 방법을 제안하였다.

넷째, Quartile별로 침투값의 퍼센트 오차를 분석한 결과 Polynomial regression의 경우 PEP는 -22.5~-29.9%, 상관계수는 0.8687~0.9031로 나타났으며, Huff method의 경우 PEP는 -2.5~-15.6%, 상관계수는 0.8164~0.8464로 나타나 실강우자료에 대한 직접적인 다항식 적용에 의한 시간분포형 유도는 침투 강우의 형태 왜곡 등으로 인한 극치강우를 제대로 반영하지 못할 우려가 있는 것으로 판단된다.

다섯째, Kernel approach에 의한 방법이 Huff에 의한 방법에 비하여 평균적으로 R^2 는 13.4~15.2% 높게 나타

났으며, MES는 24.8~39.5% 작게 산정되었고, PW-RMSE는 1.13E-05 작게 산정되어 Kernel approach에 의한 방법이 Huff (1967)에 의한 방법에 비하여 실강우 패턴을 보다 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 강우의 시간분포에 따라 민감하게 반응할 수 있는 도시하천과 같은 소규모 구역에서의 Huff의 4분위법에 의한 유출량 산정시 침투홍수량이 작게 산정되는 문제점을 보완할 수 있을 것으로 사료 된다.

마지막으로, 극치강우 자료의 분포특성을 일관성 있게 반영하며 정형화 되지 않은 형태의 분포형을 제시해줄 수 있는 핵밀도함수에 의한 강우의 시간분포 유도 방법이 분단위 자료의 실강우 특성을 반영하기에 보다 적합한 방법이라 사료되며, 우리나라와 같이 강우와 지형의 가변적 특성을 갖춘 지역에서의 보다 신뢰성 있는 시간분포 모형이 제시될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 본 연구의 방법론을 토대로 전국 지점을 대상으로 확대 적용한다면 기존의 Huff방법의 단점을 상당부분 개선할 수 있을 것으로 사료되며, Kernel approach 시간분포 적용을 통한 실험구역의 설계홍수량산정 등 유출분석의 검증 연구가 수반되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 기상청에서 제공하는 분단위 강우자료(1961~1999)와 자동기상관측자료(AWS)를 이용하여 분석하였으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 국토해양부(2000). 지역적 설계강우의 시간적 분포. 수자원관리기법 개발연구조사 연구보고서, 한국건설기술연구원.
- 기상연구소(1998). 목표 시간율에 따른 국내 지역별 강우강도 분포 예측 연구. 정보통신 연구개발사업 위탁 연구보고서, p. 81.
- 기상청(2004). 기후자료보존시스템 구축 2차년도 사업 완료보고서: 활용방안 조사서. 기상청, p. 47.
- 노재경, 이길준(1992). “홍수빈도해석을 위한 통계학적 모형.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제25권, 제2호, pp. 89-97.
- 박찬영외 3인(1981). “소유역의 설계우량 산정을 위한 강우형상 분석에 관한 연구”, **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제14권, 제4호, pp. 13-18.

- 서병하, 강관원, 윤용남(1981). “도시하수도망의 수문학적 평가와 설계확률유량의 점대화 성향에 관한 연구(제1보).” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제14권, 제4호, pp. 27-33.
- 서승덕(1965). “폭우의 시간적분포에 관한 고찰.” **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제7권, 제2호, pp. 792-797.
- 엄명진, 조원철, 허준행(2008). “GPD 모형 산정을 위한 부분시계열 자료의 임계값 산정방법 비교.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제5호, pp. 527-544.
- 오태석, 문영일(2008). “고정시간과 임의시간에 따른 우리나라 연최대강우량의 환산계수 산정.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제5B호, pp. 515-524.
- 유철상, 박창열, 김경준, 진경수(2007). “모포마 분포를 적용한 분단위 강우강도-지속시간-재현기간 관계의 유도.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제8호, pp. 643-654.
- 윤용남, 장수형, 강성규, 박민석(2004). “설계홍수량 산정을 위한 적정 설계강우시간분포의 개발.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 313-317.
- 이근후(1983). 폭우의 시간적분포에 관한 연구. 박사학위논문, 서울대학교 농공학과.
- 이정규, 추현재(2006). “Huff의 4분위법을 이용한 지속기간별 연 최대치 강우의 시간분포 특성연구.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제5B호, pp. 519-528.
- 이정주, 권현찬, 황규남(2010). “극치수문자료의 계절성 분석 개념 및 비정상성 빈도해석을 이용한 확률강수량 해석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제8호, pp. 733-745.
- 장수형, 윤재영, 윤용남(2007). “Huff 강우시간분포방법의 개선방안 연구: I. Huff방법의 국내유역 적용성 검토.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제9호, pp. 767-777.
- 주진걸, 이정호, 조덕준, 전환돈, 김중훈(2007). “도시유역의 유출특성을 고려한 강우분포 모형의 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제8호, pp. 655-663.
- 한국전자통신원(2001). 전국 지역별 분 강우강도 DB 구축 연구. 한국전자통신원, pp. 84.
- Adamowski, K., and Labatiuk, C. (1987). “Estimation of flood frequencies by a non-parametric density procedure.” *Hydrologic Frequency Modeling*, pp. 97~106.
- Arnell, V., Harremoes, P., Jensen, M., Johansen, N. B., and Niemczynowicz, J. (1984). “Review of rainfall data application for design and analysis.” *Water Science & Technology*, Vol. 16, No. 8-9, pp. 1-45.
- Clarke, J.A., R.D. de Paiva, and Uvo, C.B. (2009). “Comparison of methods for analysis of extremes when records are fragmented: A case study of using Amazon basin rainfall data.” *Journal of Hydrology*, Vol. 368, No. 1-4, pp. 26-29.
- Horner, W.M., and Jens, S.W. (1942). “Surface runoff determination from rainfall without using coefficients.” *Transaction ASCE*, Vol. 107, pp. 1039-1075.
- Huff, F.A. (1967). “Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms.” *Water Resources Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 1007-1019.
- Huff, F.A. (1986). “Urban hydrology review.” *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 67, No. 6, pp. 703-712.
- Keifer, C.J., and Chu, H.H. (1957). “Synthetic storm pattern for drainage design.” *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 83, No. HY4, pp. 1-25.
- Knapp, H.V., and Terstriep, M.I. (1981). “Effect of basin rainfall estimates on dam safety design in illinois.” *Illinois State Water Survey Contract Report 253*, pp. 57.
- Lall, U., Moon, Young-il., and Bosworth, K. (1993). “Kernel flood frequency estimators: bandwidth selection and kernel choice.” *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 4, pp. 1003-1015.
- Madsen, H., Rasmussen, P.F., and Rosbjerg, D. (1997a). “Comparison of annual maximum series and partial duration series methods for modeling extreme hydrologic events. 1. At-site modeling.” *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 747-757.
- Madsen, H., Pearson, C.P., and Rosbjerg, D. (1997b). “Comparison of annual maximum series and partial duration series methods for modeling extreme hydrologic events. 2. regional modeling.” *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 759-769.
- Moon, Y.I., and Lall, U. (1994). “Kernel quantile function estimator for flood frequency analysis.” *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 11, pp. 3095-3103.
- Ogrosky, H.O. (1964). “Hydrology of spillway design:

- Small structures-limited data." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 90, No. HY3, pp. 295-310.
- Ordon, C.J. (1974). "Volume of storm water retention basins." *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, Vol. 10, No. EEEY, pp. 1165-1177.
- Pilgrim, D.H., and Cordery, I. (1975). "Rainfall temporal pattern for design flood." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 83, No. HY1, pp. 81-95.
- Schiff, L. (1943). "Classes and patterns of rainfall with reference to surface runoff, Transactions." *American Geophysical Union*, Vol. 24, pp. 438-452.
- Sheather, S.F., and Jones, M.C. (1991). "A reliable data-based band width selection method for kernel density estimation." *Journal of Royal Statistical Society*, B, Vol. 53, No. 3, pp. 683-690.
- Soil Conservation Service. (1972). "Hydrology." *SCS National Engineering Handbook*, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, p. 110.
- Venables, W.N., Ripley, B.D. (2000). "Modern Applied Statistics with S-PLUS, 3rd ed." Springer, New York.
- Ward, A.B., Bridges, T., and Barfield, B. (1980). "An evaluation of hydrologic modeling techniques for determining a design storm hydrograph." *Proc. International Symposium on Urban Storm Runoff*, pp. 59-69.
- Yen, B.C., and Chow, V.T. (1977). "Feasibility study on research of local design storms." U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C., Report No. FHWA-RD-78-65.

논문번호: 11-075	접수: 2011.07.14
수정일자: 2012.01.06	심사완료: 2012.01.06