

미계측 유역에서의 확률강우에 대한 돌발홍수지수 산정

Estimation of the Flash Flood Index by the Probable Rainfall Data for Ungauged Catchments

김응석* · 최현일** · 지홍기***

Kim, Eung Seok · Choi, Hyun Il · Jee, Hong Kee

Abstract

As there occurs recently and frequently a flash flood due to the climate change, a sudden local flood of great volume and short duration caused by heavy or excessive rainfall in a short period of time over a small area, it is increasing that significant danger and loss of life and property in Korea as well as the whole world. Since a flash flood usually occurs as the result of intense rainfall over small steep slope regions and has rapid runoff and debris flow, a flood rises quite quickly with little or no advance warning to prevent flood damage. The aim of this study is to quantify the severity of flash flood by estimation of a flash flood index(FFI) from probability rainfall data in a study basin. FFI-D-F(FFI-Duration-Frequency) curves that present the relative severity of flash flood are developed for a study basin to provide regional basic information for the local flood forecasting and warning system particularly in ungauged catchments. It is also expected that FFI-D-F curves can be utilized for evaluation on flash flood mitigation ability and residual flood risk of both existing and planned flood control facilities.

Key words : probable rainfall, flood runoff hydrograph, flash flood index

요 지

최근 들어 기상 이변에 따라 단시간 동안에 특정 소유역에 집중하는 호우 또는 초과우량에 의한 국지성 돌발홍수가 빈번히 발생함에 따라, 이로 인한 인명과 재산의 상당한 위험과 손실은 전 세계적일 것으로서 우리나라도 증가일로에 있다. 돌발홍수는 일반적으로 급경사 소유역에서 집중적인 강우에 의해 발생하여 빠른 유출과 토석류를 동반하기 때문에, 홍수피해를 대비하기 위한 사전 홍수예보시간이 부족할 정도로 급격히 빠른 홍수의 특성을 보인다. 본 연구의 목적은 대상유역의 확률강우량으로부터 돌발홍수지수(flash flood index, FFI)를 산정하여 돌발홍수의 심각성 정도를 정량적으로 분석하고자 한다. 특히 미계측 유역 하천에서의 지역 홍수에·경보를 위한 기초자료를 제공할 수 있도록, 대상유역에 대하여 상대적인 돌발홍수심도를 제시할 수 있는 FFI-D-F(돌발홍수지수-지속시간-빈도) 관계곡선을 개발하였다. 또한 FFI-D-F 관계곡선은 현존 및 계획 방재시설물의 돌발홍수 대응능력 및 잔여홍수위험 평가에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 확률강우, 홍수유출수문곡선, 돌발홍수지수

1. 서 론

최근 빈번히 발생하는 국지성 집중호우 등의 기상이변은 급격한 유출량의 변화를 가져와 짧은 시간동안에 발생하는 홍수로 인한 피해를 가중시키고 있으며, 집중호우로 인해 피해 규모가 대형화 되어가고 있는 추세이므로, 수공구조물 설계와 운영 시, 돌발홍수를 고려한 보다 정확하고 신속한 수문분석이 요구되는 시점이다. 이를 위하여 미계측 유역에서 유출해석의 결과로부터 얻어지는 첨두유량의 산정을 필요로 하게 되며, 첨두유량의 산정에 영향을 미치는 주요 대표인자

로는 강우의 지속기간과 지형특성을 들 수 있다. 설계강우의 지속기간은 유역내 설계홍수량을 최대 발생시키는 강우의 지속기간(임계지속시간)으로, 지속기간의 변화에 따라 수문량의 변동을 가져오게 되므로 지속기간동안의 강우강도를 결정하는 유역의 확률강우강도식이나 I-D-F곡선의 산정이 필요하다(박종영 등, 2000).

일반적으로 확률홍수량은 홍수량 자료에 대하여 빈도해석을 실시하며 산정하는 방법과 확률강우량에 대하여 강우-유출 모형의 적용을 통해 산정하는 방법으로 나누어 볼 수 있다. 두 가지 방법 모두 자료와 빈도해석 과정에서의 불확실

*정회원 · 선문대학교 토목공학과 부교수(E-mail : hydrokes@sunmoon.ac.kr)

**정회원 · 영남대학교 건설시스템공학과 조교수(교신저자)

***정회원 · 영남대학교 건설시스템공학과 교수

성이 내포되어 있고, 강우-유출 모형을 적용한 방법에는 모형 자체의 불확실성이 추가로 내재되어 있다. 특히 장기간의 홍수량 자료가 부족하거나 미계측 유역에서는 강우-유출 모형을 통해 확률홍수량을 산정할 수밖에 없지만, 산정방법에 따른 비교연구는 아주 미비한 실정이다(이정은 등, 2003). 이러한 강우-유출 모형을 통한 홍수량산정에 필요한 주요 요소인 확률강우량의 경우, 시간분포 및 지속시간에 따른 침투유량의 변화 분석은 대부분의 수공구조물 설계에 사용되고 있으나, 최근 많이 발생하고 있는 돌발홍수 발생 시에는 실효성을 거두지 못하고 있다(박종영 등, 2000; 이길성 등, 2008; 이정기 등, 2009). 또한, 지점빈도분석과 지역빈도분석을 이용하여 확률강우량을 산정하거나 강우의 스케일 성질을 이용한 단기간 확률홍수량을 산정하는 연구는 과거 강우자료가 많이 있고 실측된 유출수문곡선이 있는 하천을 중심으로 수행되었다(김기봉 등, 2005; 이정훈 등, 2006; 허준행 등, 2007; 정영훈 등, 2007). 최근 많이 발생하고 있는 돌발홍수에 관한 대표적 연구는 대규모 유역의 일부를 대상으로 과거의 홍수 사상에 의한 유출특성에 따른 돌발홍수심도를 산정하거나(Bhaskar 등, 2000; 정재철, 2000; 김병식 등, 2008), 특정 하천 유역을 대상으로 한계유출량 산정 등에 대하여 주로 수행되었다(김운태 등, 2000, 2002; 배덕효 등 2001, 2004; 전경수 등 2001; 최현 등 2006). 유출특성으로부터 돌발홍수심도를 산정하는 기존 연구에서는 실측된 유출수문곡선자료를 이용하여 돌발홍수지수를 산정하였으나, 국내의 소유역의 경우 실측된 유출수문곡선 자료가 그다지 많지 않은 관계로 인해 돌발홍수심도를 산정하는데 많은 어려움을 내포하고 있다. 따라서 본 연구에서는 강우자료를 이용해 유출수문곡선을 해석할 수 있는 HEC-HMS(Hydrologic Modeling System) 모형을 이용하여 유출수문곡선을 모의하고 이를 통한 미계측 소유역의 돌발홍수의 심각성 정도를 정량화 하고자 하였으며, 기존의 김응석 등(2009)의 연구결과인 실측강우의 돌발홍수지수가 아닌 빈도별 지속시간별 확률강우에 대한 돌발홍수지수를 산정하여 돌발홍수지수와 강우강도, 최대시우량, 총강우량 및 총유출량과의 상관관계를 분석하였다. 또한, I-D-F곡선을 응용한 FFI-D-F곡선을 적용하여 미계측 유역에서의 강우에 대한 돌발홍수지수를 정량화하여 돌발홍수의 예·경보를 위한 기초 자료와 각 방재시설물 계획 및 운영 시 돌발홍수에 대한 대응능력 및 잔여홍수위험을 상대적으로 평가하는 지표를 제공하고자 한다.

2. 돌발홍수지수

돌발홍수는 짧은 시간동안에 많은 강우가 집중 될 때 주로 경사가 급한 계곡에서 많이 발생하며 강우가 계곡의 하천으로 모여 수위가 급상승하게 되면 흐름의 앞부분에 큰 파가 형성되어 계곡을 따라 하류로 순식간에 흘러가는 것과 같은 것이라고 할 수 있다. 이때 수중에 흙이나 자갈, 바위가 포함된 토석류를 형성한다. 돌발홍수가 발생하는 원인은 여러 가지가 있을 수 있으나 대개는 제한된 지역에 집중된 호우로 발생한다. 대부분의 돌발홍수는 정체되거나 또는 그 부근에서

만 움직이는 소나기성 호우나 태풍 등에 의한 높은 강도의 호우 때문에 발생하며 댐과피나 제방붕괴 등은 최악의 돌발홍수를 발생시킨다(정재철, 2000).

본 연구에서는 유출수문곡선 형태의 특성을 분석한 Bhaskar 등(2000)의 연구내용을 토대로, 미계측 소유역에서 빈도별 지속시간별 확률강우량에 의해 모의된 유출수문곡선의 상승부 경사(K), 홍수량 비(M), 홍수반응 시간(T_p) 등을 고려하여 각각의 확률홍수사상에 대해 돌발홍수지수(flash flood index, FFI)를 산정하였다. 돌발홍수지수 산정을 위한 3개의 심도계수들(K, M, T_p)의 무차원 지수화방법은 기존의 연구에서 제시한 방법들(안원식, 2000; 김병식 등, 2008; 김응석 등, 2009)을 참고하여, 아래와 같이 분석대상 최대값 또는 최소값에 대한 비로 산정하였다.

2.1 홍수수문곡선의 상승부 경사(K)

기본적으로 그 지역의 지형학적 특성을 내포하고 있는 유출수문곡선 상승부의 기울기는 상승부의 경사도 값으로 나타낼 수 있으므로, 홍수수문곡선의 상승곡선은 Bhaskar 등(2000)에서 제시한 다음 식(1)과 같은 형태의 일반적인 지수식으로 나타내며, 상승부 경사 K값은 식(2)를 이용하여 산정할 수 있다. 식(1)에서 K값이 증가하면 시간 후에 엄청난 크기의 홍수량이 발행하게 되며 하도에 큰 영향을 미치게 되어 돌발홍수의 발생가능성이 커질 수 있다.

$$Q_t = Q_0 e^{Kt} \quad (1)$$

$$K = \frac{24 \ln(Q_t/Q_0)}{t} \quad (2)$$

여기서, Q_0 : 초기유량, Q_t : 홍수반응시간 T_p 에 가까운 시간에서의 유량, K : 상승곡선 기울기 (/day), t : 시간(hr)이다.

2.2 홍수량 비(M)

홍수량 비(M)는 홍수수문곡선에 대한 침투홍수량과 평균유량의 비이며, 해당 유역의 평균유량과 비교하여 얼마나 큰 홍수량이 발생하였는지를 파악 할 수 있는 인자로서, 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = Q_{\max}/Q_a \quad (3)$$

여기서, Q_{\max} : 침투홍수량, Q_a : 장기간의 평균유량 이다.

2.3 홍수반응 시간(T_p)

홍수반응(지체)시간 T_p 는 유출수문곡선으로부터 직접 산정할 수 있으며, 홍수사상의 시작과 침투홍수량이 발생한 시간으로 정의된다. 짧은 홍수반응 시간은 높은 유출 속도를 갖는 일반적인 돌발홍수와 관련이 있으며 이러한 관점에서 작은 값의 홍수반응 시간은 높은 상대심도를 갖게 된다. T_p 의 단위는 시간(hr)이며 값이 작으면 작을수록 홍수 유출속도가 높은 것을 의미한다.

2.4 상대심도지수

본 연구에서는 각 홍수사상의 심도계수(K_i , M_i , T_{p_i})의 상대심도를 정량화하기 위하여 분석대상인 7개 빈도별(2, 3, 5, 10, 20, 50, 80년 빈도) 및 6개 지속시간별(1, 3, 6, 12, 18, 24시간) 확률강우량(3.2절 및 표 1 참조)에 대한 강우-유출모의를 통한 총 46개의 홍수사상(3.5절 및 표 3 참조)을 대상으로 최대 상승부 경사(K_{max}) 및 홍수량 비(M_{max}) 값들과 최소 홍수반응 시간($T_{p_{min}}$) 값에 대한 비를 구하여, 다음 식(4)~(6)과 같이 지수화 하였다.

$$RK = \frac{K_i}{K_{max}} \quad (4)$$

$$RM = \frac{M_i}{M_{max}} \quad (5)$$

$$RT_p = \frac{T_{p_{min}}}{T_{p_i}} \quad (6)$$

여기서 첨자 i 에 해당하는 값들은 각 홍수사상별 수치를 의미하며, RK , RM , RT_p 는 각각 3개의 심도계수인 상승부 경사(K), 홍수량 비(M), 홍수반응 시간(T_p)에 대한 상대심도지수이다.

2.4 돌발홍수지수(FFI)

유출수문곡선의 상승부 경사(K)와 홍수량 비(M)는 상대적으로 큰 값을 가지면 돌발홍수 가능성이 커지게 되지만, 홍수반응 시간(T_p)의 경우는 값이 작을수록 돌발홍수 현상에 접근하게 된다. 식(3), (5) 그리고 (6)을 이용하여 지수화 한 이들 인자들에 대한 상대심도지수의 산술평균 백분율을 취하여, 다음 식(7)과 같이 돌발홍수지수(FFI)를 산정할 수 있다.

$$FFI = \frac{(RK + RM + RT_p)}{3} \times 100(\%) \quad (7)$$

3. 적용 및 결과

3.1 대상유역선정

본 연구에서는 강우사상에 따른 유출수문곡선이 대부분 실측되지 않는 중소규모의 지방하천을 대상으로 시범유역을 선정하였다. 한강을 비롯한 4대강과 같은 대하천 유역의 경우는 대부분이 하천의 주요지점에 수위계를 설치하여 수위-유

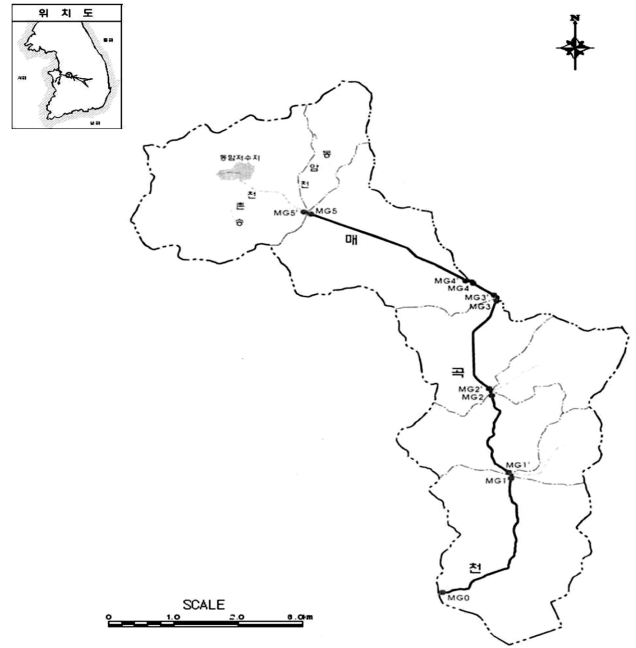


그림 1. 매곡천 유역도

량관계로부터 유출수문곡선을 계산하고 있다. 그러나 작은 규모의 유역을 가진 중소하천의 경우는 유출수문곡선을 실측하지 않은 관계로 인해 돌발홍수 발생에 따른 정량적 심도를 산정하기가 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 강우-유출모형을 통한 돌발홍수지수의 산정을 위하여 충청남도 아산시 매곡천 유역을 대상유역으로 선정하였다. 매곡천은 곡교천의 제1지류 하천으로 유역면적 35.48 km², 유로연장 11.25 km이며 동경 127°01'56"~127°07'29", 북위 36°46'44"~36°51'48" 사이에 위치하는 지방 2급 하천으로 유역의 형상은 수지상을 이루고 유역 평균폭은 3.15 km, 유역의 형상계수는 0.28로 약 EL.275 m 미만의 표고가 유역계를 형성하고 있다. 그림 1은 매곡천 유역도를 나타내고 있다.

3.2 수문자료 수집

본 연구에서는 1973년부터 2003년까지 총 31년간의 천안 관측소 기상청 자료를 이용하여 확률강우량을 산정하였다. 다음 표 1은 매곡천 유역의 빈도별 확률강우량을 나타내고 있다. 돌발홍수는 짧은 시간에 많은 강우를 내리는 강우사상이므로, 강우지속시간 1시간부터 24시간까지(1, 3, 6, 12, 18, 24시간) 빈도별(2, 3, 5, 10, 20, 50, 80년 빈도) 확률강우량

표 1. 매곡천 유역의 확률강우량 자료(단위 : mm)

지속 시간 \ 빈도	2년	3년	5년	10년	20년	50년	80년
1시간	40.3	46.1	52.6	60.7	68.5	78.5	83.7
3시간	68.4	79.1	91.1	106.1	120.5	139.1	148.6
6시간	94.3	110.5	128.6	151.3	173.0	201.2	215.5
12시간	121.0	143.2	167.9	198.9	228.7	267.2	286.8
18시간	135.9	160.1	187.0	220.8	253.2	295.2	316.6
24시간	144.7	170.2	198.6	234.2	268.4	312.7	335.2

을 산정하였다(충청남도, 2004).

3.3. 강우의 시간분포

수공구조물을 설계하고자 하는 유역에서 선택한 확률강우량을 유역 대표단위도나 합성단위도를 이용하여 설계홍수량으로 합성하기 위해서는 강우의 시간분포 즉, 유출에 기여하는 설계우량주상도를 결정하여 첨두홍수량이나 유출수문곡선을 산정하여야 한다. 확률강우량의 시간적 분포 양상은 설계 지역의 과거 강우자료로부터 강우지속시간 동안에 총우량이 시간이 경과함에 따라 어떻게 분포되는가를 통계학적으로 분석하여 그 지역에 적합한 시간분포형을 도출함으로써 결정되며, 이를 강우-유출 모형에 적용하여 유출수문곡선을 결정할 수 있다. 확률강우량의 시간분포를 결정할 수 있는 방법은 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 「1999년도 수자원 관리 기법개발연구조사 보고서 제2권 한국가능최대강수량 추정 별책 제2권 지역적 확률강우량의 시간적 분포(2000.6)」를 참고하여 Huff의 4분위법을 이용한 구간별 확률별 무차원누가곡선을 사용하였다. Huff의 4분위법의 경우 첨두우량이 발생하는 위치를 지속시간을 축으로 4개 분위로 나누고, 각 분위마다 해당지점의 관측자료로부터 회귀분석을 통하여 적정분포곡선을 산정하여 이에 따라 확률강우량을 분포시키는 방법이기에 때문에 해당지점의 강우특성을 고려할 수 있다는 장점이 있다. 이 방법은 개념상 비교적 단순하면서도 물리적으로도 의미를 가지고 있으며, 대량의 강우자료에 대해서도 짧은 시간 내에 계산이 가능하기 때문에 많이 사용되고 있다. 그러나 첨두우량의 발생시각이 4개로 한정되어 있으므로 많은 기록을 가지지 않은 지역의 통계적 특성치는 오차가 발생할 우려가 있으므로 주의해서 사용하여야 한다. 본 연구에서는 실제 매곡천 유역의 하천정비기본계획보고서(충청남도, 2004)에서 사용된 Huff의 3분위법을 적용하였다.

3.4. 유출수문곡선 매개변수 산정

본 연구에서는 실측된 강우자료를 이용하여 유출수문곡선을 산정하기 위해서 HEC-HMS모형을 적용하여 수행하였다. HEC-HMS모형에 필요한 매개변수는 다음 표 2와 같이 정리하였다.

유역홍수추적방법으로는 Clark 유역추적법을 사용하였고, 하도홍수추적은 유역의 면적 및 유로연장이 작이 생략하였다. Clark 단위도 산정에 필요한 매개변수 중 도달시간(time of concentration)을 산정하기 위한 방법으로는 Kirpich 공식, Rziha 공식, Kraven(I) 공식, Kraven(II) 공식 등이 있다. 따라서 이와 같이 열거한 방법들을 적용하여 산정해 본 결과 Kirpich 공식, Rziha 공식의 평균유속은 각각 1.19 m/s로 동일하고, Kraven(I) 공식은 평균유속 3.32 m/s, 그리고

Kraven(II) 공식은 평균유속 3m/s를 나타내었다. 홍수시 일반적인 유속범위 2~3.5 m/s의 값을 고려하고 매곡천 하천정비 기본계획보고서(충청남도, 2004)의 산정결과 값과 비교하여, Kraven(I) 공식의 결과인 평균유속 3.32 m/s값을 도달시간으로 채택하였다. 또한, 저류상수(storage coefficient)를 산정하는 방법으로는 미계측유역에서 사용하는 Clark 방법, Linsely 공식, Russel 공식, Sabol 공식, Peter 공식 등을 적용하였다. 산정결과 Clark 방법은 값이 너무 크게 산정되었고, Linsley, Russel, Sabol, Peter 공식은 결과 값이 비슷하게 산정되어, 실무에서 많이 쓰이는 Sabol 공식의 산정값을 적용하였다. 기저유량(baseflow) 매개변수는 HEC-HMS에 매뉴얼에 기술되어 있는 기본값을 사용하였다.

3.5. 돌발홍수지수 산정

빈도별 지속시간별 확률강우량에 대하여 HEC-HMS를 이용하여 모의한 42개의 유출수문곡선으로부터 돌발홍수지수를 산정하기 위해서 2절에 언급한 유출수문곡선의 상승부 경사(K), 홍수량 비(M), 홍수반응 시간(T_p)에 대한 상대심도지수를 각각 산정하였다. 상승부 경사의 상대심도(RK) 및 홍수량 비의 상대심도(RM)의 산정을 위한 초기유량 Q_0 및 평균유량 Q_a 의 값은 실측된 유출수문곡선이 없으므로, 매곡천 하천정비 기본계획서(충청남도, 2004)의 자료를 이용하였다. 값은 DAWAST 유출량 모의결과중 하절기 초기유량의 평균값인 $2.1 \text{ m}^3/\text{sec}$ 를 적용하였고, 는 매곡천 월별 유출량의 전체 평균값인 $0.7 \text{ m}^3/\text{sec}$ 를 적용하였다. 식 (4), (5), 그리고 (6)을 이용한 상대심도지수 및 식(7)을 이용한 매곡천 유역 확률강우량별 돌발홍수지수 산정결과를 다음 표 3에 나타내었다.

이상의 분석된 돌발홍수지수는 분석대상 홍수사상의 상대적 심도를 나타내는 것으로, 분석결과를 살펴보면 42개의 확률홍수량에 대한 홍수사상 중 가장 큰 돌발홍수지수는 80년 빈도 1시간 강우지속시간에 발생하여 74.12의 값으로 산정되었으며, 가장 작은 돌발홍수지수는 2년 빈도 24시간 강우지속시간에 발생하여 12.73의 값을 나타내었다. 돌발홍수지수값이 클수록 발생한 홍수의 심도가 상대적으로 큰 것을 의미하므로, 이는 산정된 돌발홍수지수가 짧은 시간에 집중하는 강우에 의해 발생하는 돌발홍수의 특성을 잘 반영하고 있음을 보여준다. 또한, 42개 호우사상의 전체 평균 돌발홍수지수는 36.74로 나타났다. 한편, 돌발홍수지수를 산정하는 3개의 심도계수중 홍수반응 시간은 빈도별 강우지속시간에 따라 거의 유사한 결과를 보여 확률빈도에 따른 홍수심도 영향에 적은 상관성을 보이며, 상승부 경사와 홍수반응 시간의 경우 두 계수가 유출수문곡선의 비슷한 특성을 중복적으로 반영할 수 있으므로, 각 심도계수에 대한 상관성 및 독립성에 관해 연구가 추후에 필요하다고 판단된다.

표 2. 매곡천 유역의 HEC-HMS 매개변수

Loss Rate Parameter	Clark's Parameter		Baseflow Parameter		
	Time of Concentration (hr)	Storage Coefficient (hr)	Initial Q (cms/sqkm)	Recession Constant	Threshold Q (ratio-to-peak)
SCS Curve Number	0.94	2.02	0.00	0.03645	0.10

표 3. 홍수사상별 돌발홍수지수

no	Flood Runoff Characteristics				Flood Indexing Parameters								
	Flood data	Flood Peak Q_p (cms)	Mean Q_a (cms)	Time to Peak T_p (hr)	Rising curve gradient K (day ⁻¹)	Flood magnitude ratio M	Flood response time T_p (hr)	Relative Severity Factors			Flash flood index FFI		
								RK	RM	RT	Sum	Ave	%
1	2year 1hr	32	0.7	1	65.4	45.77	1	0.73	0.08	1.00	1.81	0.60	60.40
2	2year 3hr	117.13	0.7	3	32.17	167.33	3	0.36	0.30	0.33	0.99	0.33	33.05
3	2yea 6hr	147.07	0.7	5	20.4	210.1	5	0.23	0.38	0.20	0.80	0.27	26.78
4	2year 12hr	132.29	0.7	9	11.05	188.99	9	0.12	0.34	0.11	0.57	0.19	19.07
5	2year 18hr	118.8	0.7	14	6.92	169.71	14	0.08	0.30	0.07	0.45	0.15	15.45
6	2year 24hr	102.56	0.7	17	5.49	146.51	17	0.06	0.26	0.06	0.38	0.13	12.73
7	3year 1hr	38.9	0.7	1	70.07	55.61	1	0.78	0.10	1.00	1.88	0.63	62.73
8	3year 3hr	142.15	0.7	3	33.72	203.07	3	0.38	0.36	0.33	1.07	0.36	35.76
9	3year 6hr	179.19	0.7	5	21.34	255.99	5	0.24	0.46	0.20	0.90	0.30	29.86
10	3year 12hr	169.84	0.7	9	11.71	242.63	9	0.13	0.43	0.11	0.68	0.23	22.52
11	3year 18hr	143.32	0.7	13	7.8	204.74	13	0.09	0.37	0.08	0.53	0.18	17.66
12	3year 24hr	123.14	0.7	17	5.75	175.91	17	0.06	0.31	0.06	0.44	0.15	14.58
13	5year 1hr	46.9	0.7	1	74.55	67.02	1	0.83	0.12	1.00	1.95	0.65	65.08
14	5year 3hr	169.06	0.7	3	35.11	241.51	3	0.39	0.43	0.33	1.16	0.39	38.57
15	5year 6hr	215.44	0.7	5	22.23	307.77	5	0.25	0.55	0.20	1.00	0.33	33.28
16	5year 12hr	203.91	0.7	9	12.2	291.3	9	0.14	0.52	0.11	0.77	0.26	25.60
17	5year 18hr	170.62	0.7	13	8.12	243.74	13	0.09	0.44	0.08	0.60	0.20	20.11
18	5year 24hr	146.01	0.7	17	5.99	208.59	17	0.07	0.37	0.06	0.50	0.17	16.62
19	10year 1hr	57.2	0.7	1	79.3	81.69	1	0.89	0.15	1.00	2.03	0.68	67.72
20	10year 3hr	207.26	0.7	3	36.74	296.09	3	0.41	0.53	0.33	1.27	0.42	42.42
21	10year 6hr	261.25	0.7	5	23.15	373.21	5	0.26	0.67	0.20	1.13	0.38	37.52
22	10year 12hr	246.69	0.7	9	12.71	352.41	9	0.14	0.63	0.11	0.88	0.29	29.43
23	10year 18hr	204.85	0.7	13	8.46	292.64	13	0.09	0.52	0.08	0.69	0.23	23.15
24	10year 24hr	174.6	0.7	17	6.24	249.43	17	0.07	0.45	0.06	0.57	0.19	19.14
26	20year 1hr	67.3	0.7	1	83.22	96.19	1	0.93	0.17	1.00	2.10	0.70	70.04
26	20year 3hr	242.73	0.7	3	38	346.76	3	0.42	0.62	0.33	1.38	0.46	45.91
27	20year 6hr	305.25	0.7	5	23.9	436.07	5	0.27	0.78	0.20	1.25	0.42	41.54
28	20year 12hr	287.77	0.7	9	13.12	411.1	9	0.15	0.73	0.11	0.99	0.33	33.08
29	20year 18hr	237.58	0.7	13	8.73	339.4	13	0.10	0.61	0.08	0.78	0.26	26.03
30	20year 24hr	201.98	0.7	17	6.45	288.54	17	0.07	0.52	0.06	0.65	0.22	21.55
31	50year 1hr	80.6	0.7	1	87.55	115.18	1	0.98	0.21	1.00	2.18	0.73	72.78
32	50year 3hr	289.02	0.7	3	39.4	412.89	3	0.44	0.74	0.33	1.51	0.50	50.37
33	50year 6hr	362.59	0.7	5	24.73	517.99	5	0.28	0.93	0.20	1.40	0.47	46.73
34	50year 12hr	340.76	0.7	9	13.57	486.8	9	0.15	0.87	0.11	1.13	0.38	37.75
35	50year 18hr	279.89	0.7	13	9.03	399.84	13	0.10	0.71	0.08	0.89	0.30	29.74
36	50year 24hr	237.33	0.7	17	6.67	339.04	17	0.07	0.61	0.06	0.74	0.25	24.64
37	80year 1hr	87.6	0.7	1	89.55	125.2	1	1.00	0.22	1.00	2.22	0.74	74.12
38	80year 3hr	312.81	0.7	3	40.03	446.87	3	0.45	0.80	0.33	1.58	0.53	52.63
39	80year 6hr	391.7	0.7	5	25.1	559.57	5	0.28	1.00	0.20	1.48	0.49	49.34
40	80year 12hr	367.69	0.7	9	13.77	525.27	9	0.15	0.94	0.11	1.20	0.40	40.12
41	80year 18hr	301.41	0.7	13	9.17	430.59	13	0.10	0.77	0.08	0.95	0.32	31.63
42	80year 24hr	255.24	0.7	17	6.78	364.63	17	0.08	0.65	0.06	0.79	0.26	26.21
	평균	195.22	0.70	8.02	27.51	278.90	8.02	0.31	0.50	0.30	1.10	0.37	36.74

3.5 돌발홍수지수의 상관분석

본 절에서는 42개의 호우사상별 돌발홍수지수(FFI)와 강우 특성 및 유출량과의 관계를 비교 분석하기 위해 상관분석을 실시하였다.

그림 2는 돌발홍수지수와 평균강우강도(I_a)와의 관계를 나타낸 것으로, 회귀식은 식(8)과 같으며 상관계수 R^2 는 0.948이다. 여기서 평균강우강도는 지속시간별 확률강우량의 총량을 지속시간으로 나눈 값을 의미한다.

$$FFI = 24.14 \ln(I_a) - 37.06 \quad (8)$$

그림 3은 돌발홍수지수와 최대시우량(R_m)과의 관계를 나타낸 것으로, 회귀식은 식(9)와 같으며 상관계수 R^2 는 0.790이다. 여기서 최대시우량은 확률강우량의 시간분포시 최대값을 말한다.

$$FFI = 0.79 R_m + 4.30 \quad (9)$$

그림 4는 돌발홍수지수와 총강우량(R_t)과의 관계를 나타낸 것으로, 회귀식은 식(10)과 같으며 상관계수 R^2 는 0.366이다.

$$FFI = -18.79 \ln(R_t) + 130.04 \quad (10)$$

그림 5는 돌발홍수지수와 총유출량(Q_t)과의 관계를 나타낸 것으로, 회귀식은 식(11)과 같으며 상관계수 R^2 는 0.503이다

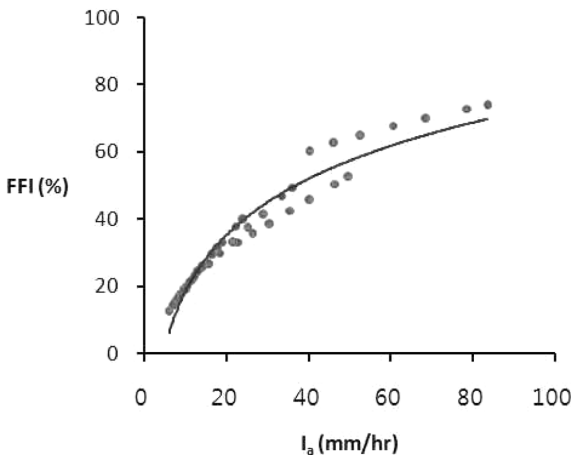


그림 2. FFI-Ia 상관관계

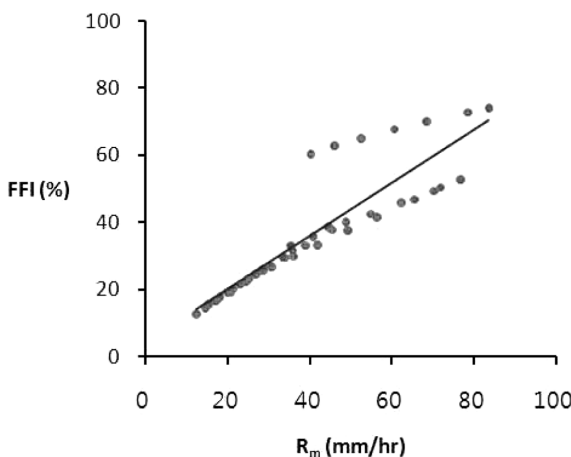


그림 3. FFI-Rm 상관관계

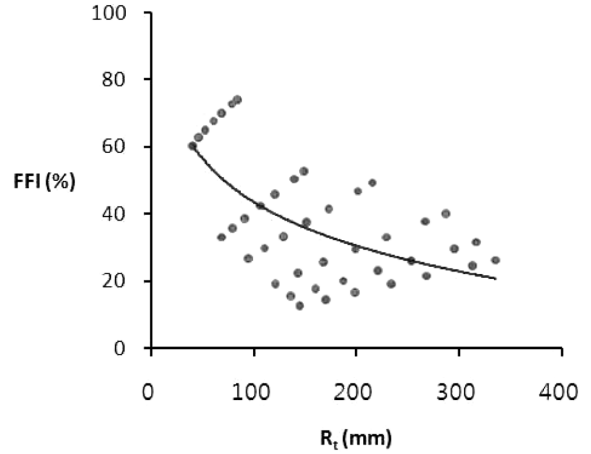


그림 4. FFI-Rt 상관관계

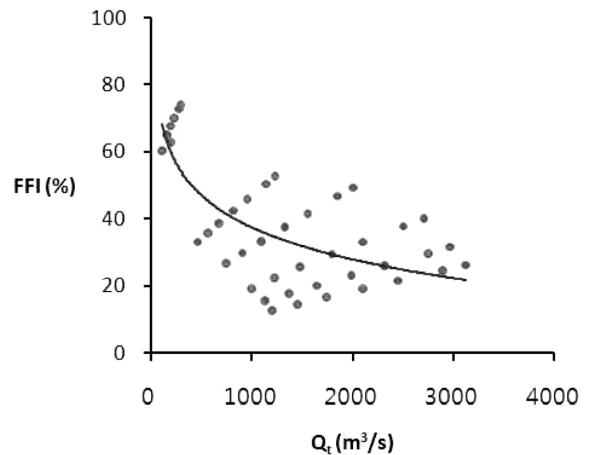


그림 5. FFI-Qt 상관관계

$$FFI = -13.77 \ln(Q_t) + 132.53 \quad (11)$$

확률강우에 의한 돌발홍수지수와 강우특성과의 상관관계 분석 결과, 강우자료가 돌발홍수지수의 산정에 사용된 침도계수에 직접적으로 포함되지는 않았지만 돌발홍수지수와 상관계수가 평균강우강도(I_a)와 0.948, 그리고 최대시우량(R_m)과 0.790으로 매우 높게 나타났다. 이는 돌발홍수의 정의에서 언급한 바와 같이 짧은 시간에 집중된 많은 강우량이 돌발홍수의 원인이 되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 돌발홍수지수와 상관계수가 총강우량(R_t)과 0.366, 그리고 총유출량(Q_t)과는 0.503으로 나타났으며, 총강우량 및 총유출량의 경우 돌발홍수지수와 전체적으로 반비례관계이나 그 상관성이 비교적 낮은 것으로 분석되었다.

4. FFI-D-F 곡선

4.1 I-D-F 곡선

수문학적 분석에서는 관측된 강우의 강도 및 지속시간과 함께 확률개념을 도입한 분석이 필요하다. 평균강우강도는 관측된 강우깊이를 관측기간으로 나누어 얻게 된다. 강우강도는 지표면 유출의 결정에 중요한 역할을 하게 되며 만일 지표면에 도달하는 강우강도가 토양으로 침투되는 율보다 크게 되면 지표면 유출이 발생하게 되고, 초과된 지표면은 유출은

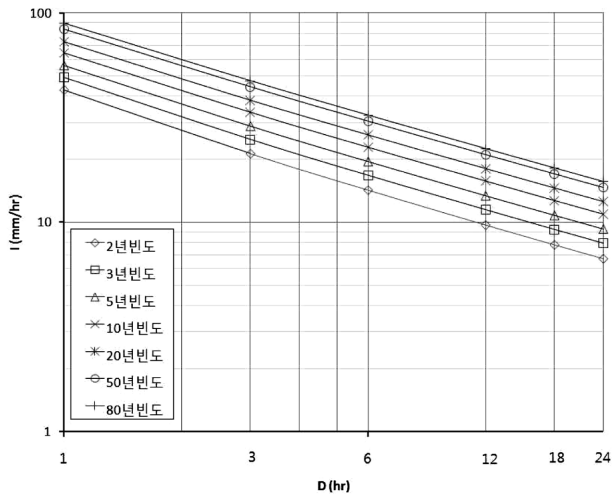


그림 6. 매곡천 I-D-F 곡선

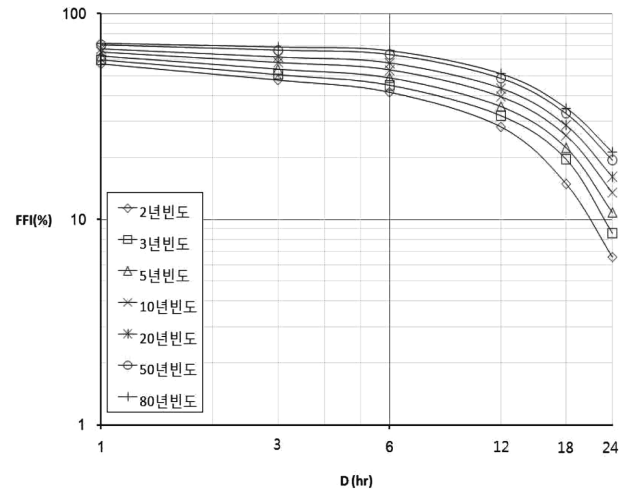


그림 7. 매곡천 FFI-D-F 곡선

하천으로 빠르게 유입되어 하류지역에 홍수를 발생시키기도 한다. 일반적으로 발생빈도가 같을 경우 강우의 지속기간이 길어지게 되면 강우강도는 작아지게 된다. 다시 말하면 강우강도가 크면 그 강우가 지속되는 기간이 짧다. 강우강도와 지속기간 및 발생빈도의 관계를 나타내는 식을 재현기간별 강우강도식이라 하며, 지역적인 특성을 보인다. 따라서 여러 가지 목적의 설계 즉, 단지설계, 비행장 및 주차장 설계, 도로의 암거 및 도시지역의 우수관거 등을 설계할 때 강우의 지속기간에 따른 확률강우강도를 산정하고 이를 유출량으로 환산하여 유용하게 사용할 수 있다. 본 연구에서는 돌발홍수 지수 산정을 위해 강우 지속시간 1시간, 3시간, 6시간, 12시간, 18시간, 24시간에 대하여 2, 3, 5, 10, 20, 50, 80년 빈도를 적용한 매곡천 유역의 I-D-F(강우강도-지속시간-빈도) 곡선을 산정하여 그림 6에 나타내었다.

4.2 FFI-D-F 곡선

FFI-D-F(돌발홍수지수-지속시간-빈도) 곡선은 I-D-F 곡선과 같은 방식으로 작성된다. 먼저 I-D-F 곡선의 강우강도 I를 돌발홍수지수(FFI)로 변환하여 FFI-D-F 관계를 작성하고, 그래프 아래쪽의 지속시간은 I-D-F 곡선과 같게 작성한다. 그림 7은 매곡천 유역의 I-D-F 곡선을 응용한 FFI-D-F 곡선이다. 돌발홍수는 짧은 시간에 많은 강우량이 주요 원인이 되므로 그림 7의 FFI-D-F 곡선에서 지속시간이 짧고 빈도가 높을수록 돌발홍수의 가능성이 높은 것을 알 수 있으며, FFI-D-F의 그래프를 이용하면 강우발생에 따른 돌발홍수의 상대심도를 예측할 수 있다. 특히 지속시간이 짧을 경우, 빈도별 돌발홍수심도가 큰 차이 없이 높은 값을 나타내고 있어, 첨두홍수까지의 짧은 도달시간이 돌발홍수에 더욱 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 따라서 FFI-D-F의 그래프를 이용하면 지역적 돌발홍수를 예측하는 돌발홍수 예·경보의 기초자료를 마련할 수 있을 뿐만 아니라, 수공구조물 설계 및 운영 시, 각 방재시설물의 돌발홍수에 대한 대응능력 및 잔여홍수 위험을 상대적으로 평가하는 지표로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 예를 들어, 기존 설계기준에 해당하는 확률강우량이 목표수준인 돌발홍수지수에 미달할 경우, 치수경제성 분석

에 의해 설계빈도를 상향조정하거나, 부족한 돌발홍수대응능력의 제고를 위하여 비구조적인 대응방안을 병행하여 수립하는 등 방재시설물 계획 및 운영을 위한 치수대책 수립에 사용될 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 미계측 소유역인 매곡천 유역을 대상으로 과거 31년간의 강우자료를 이용하여 각 빈도별 지속시간별 확률강우량에 대한 유출수문곡선을 HEC-HMS모형을 적용하여 모의한 후, 이를 통하여 돌발홍수지수를 산정하였다. 또한 기존에 한계유출량을 이용하여 돌발홍수를 연구하는 방법이 아닌 유출수문곡선을 이용한 돌발홍수지수를 산정하여 미계측 소유역에서 발생하는 돌발홍수의 정도를 객관적으로 정량화하였고, FFI-D-F 곡선의 개발로 돌발홍수 예·경보를 위한 기초자료 및 각 방재시설물의 돌발홍수 대응능력과 잔여홍수위험을 상대적으로 평가하는 지표를 제공하고자 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기존의 연구에서 돌발홍수심도는 실측된 유출수문곡선을 바탕으로 산정되었으나 본 연구에서는 미계측 중소 지방 하천에서 돌발홍수심도를 산정하기 위해 HEC-HMS모형을 적용하여 유출수문곡선을 모의하여 산정하였다. 확률강우에 대한 돌발홍수심도를 산정하기 위하여, 빈도별 지속시간별 확률강우량을 산정한 후 HEC-HMS 모형을 통해 모의된 유출수문곡선을 기준으로 돌발홍수심도를 산정하였다. 따라서 본 연구는 수공구조물 설계 시 사용되는 확률강우량에 대한 중소하천 유역에서 돌발홍수심도를 산정하는데 많은 도움을 줄 수 있으리라 판단된다.
- 2) 본 연구에서 적용한 42개의 확률강우량에 대한 돌발홍수심도와 강우 및 유출특성의 상관관계분석에서 돌발홍수지수와 평균강우강도, 최대시우량, 총강우량 및 총유출량과의 상관관계수 R^2 은 각각 0.948, 0.790, 0.366 및 0.503으로 산정되었으며, 평균강우강도가 가장 큰 상관관계를 나타내었다. 돌발홍수지수를 결정하는 3개의 심도계수에 직접 포함되지 않았지만, 강우특성이 돌발홍수

발생과 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있다.

- 3) 돌발홍수지수를 구성하는 3가지 요소, 즉 홍수유출수문 곡선의 상승부 경사, 홍수량 비, 홍수 반응시간은 강우 특성의 직접적인 영향을 받는 항목으로 3가지 요소가 모두 상관관계가 있다고 판단되며, 상승부 경사와 홍수 반응 시간의 경우 비슷한 특성을 중복적으로 반영할 수 있으므로, 각 심도계수에 대한 상관성 및 독립성에 관해 연구가 추후에 필요하다고 판단된다. 또한, 본 연구에서는 확률강우량의 시간분포 방법으로 매곡천 유역의 하천 정비기본계획 및 수공구조물 설계 시 주로 사용되고 있는 Huff의 3분위를 적용한 바, 강우분포 변화에 대한 돌발홍수심도 영향을 후속연구에서 분석할 필요가 있다고 사료된다.
- 4) 소규모 유역에서 돌발홍수는 강우시작으로부터 단시간내에 발생하는 경향이 많으므로, FFI-D-F 곡선을 이용하면 강우의 실시간 예측 및 측정을 바탕으로 돌발홍수지수를 간편하고 신속하게 산정할 수 있다. 이와 같이 FFI-D-F 곡선을 이용하면 돌발홍수심도를 간접적으로 예측할 수 있으나, 현재 돌발홍수지정에 대한 구체적 기준이 확립되지 않아 예·경보에 어려움이 있으므로, 우선적으로 돌발홍수기준의 확립이 필요하다고 사료된다.
- 5) 기존의 확률강우량을 바탕으로 한 설계강우량 산정은 수공구조물의 규모결정에 일반적으로 많이 적용되어 왔지만, 돌발홍수 발생 시에는 실효를 거두지 못하는 경우가 늘어나고 있다. 실제 대규모 하천의 경우 홍수피해 방지를 위해 많은 구조적 또는 비구조적 홍수방어 대책을 수립하고 있으나 국내의 경우 중소 하천이 위치한 지역의 홍수피해에 대한 저감대책이 미흡한 실정이다. 따라서 개발된 FFI-D-F 곡선은 현존 및 계획 방재시설물의 돌발홍수 대응능력 및 잔여홍수위험 평가에 사용되어, 시설물 규모를 확대하거나 비구조적 대책을 연계하는 등 종합적 치수대책을 유도할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

김기봉, 남우성, 김태순, 안원식 (2005) 지점빈도해석을 적용한 확률강우량의 불확실성 분석. **대한토목학회 학술대회논문집**, 대

한토목학회, pp.1445-1448.
 김병식, 김형수 (2008) 유출수문곡선과 돌발홍수지수를 이용한 돌발홍수심도 산정. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제2호, pp.185-196.
 김운태, 김진훈, 배덕효 (2000) 수문학적 한계유출량 평가. **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp.739-742.
 김운태, 배덕효, 조천호 (2002) 돌발홍수예보를 위한 미소유역의 한계 유출량산정. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제5호, pp.553-561.
 김용석, 최현일, 이동의, 강동진 (2009), 돌발홍수지수를 이용한 돌발홍수심도 산정. **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제9권, 제6호, pp. 125~131.
 박종영, 이정식, 이재준 (2000) 확률강우강도식의 형태에 따른 지속기간별 침투유량의 변화. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, v.33, no.S1, pp.203-208.
 배덕효, 최지혜, 장기호 (2001) 평창강유역의 한계유출량 산정. **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp.286-291.
 배덕효, 김진훈, 장기호 (2004) 한강유역의 한계유출량 산정. **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp.153-157.
 안원식 (2000) 돌발홍수지수 산정에 관한 연구. **수원대학교 논문집**, 제15권, pp.11-19.
 이길성, 박경신, 정은성, 김상욱 (2008) 지점빈도분석과 지역빈도 분석을 이용한 확률홍수량 산정. **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp.2249-2253.
 이정기, 김형수 (2009) 확률강우의 시간분포 비교와 설계홍수량 산정에 관한 연구. **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회 학술발표회 초록집, pp.98-102.
 이정은, 허준행, 김경덕, 김남원 (2003) 실측 강우량과 홍수량 자료에 의해 산정된 확률홍수량의 비교. **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회 학술발표회논문집(1), pp.54-57.
 이정훈, 김창성, 김문모, 여운광 (2006) 확률홍수량에 따른 도시 하천 제방의 여유고 분석. **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp.1488-1492.
 전경수, 김병익(2001) 돌발홍수 예경보 시스템. **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제34권 제2호, pp.48-56.
 정영훈, 김수영, 김태순, 허준행 (2007) 강우의 스케일 성질을 이용한 단기간 확률강우량의 산정. **대한토목학회 학술대회논문집**, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.1172-1175.
 정재철 (2000) 돌발홍수지수에 관한 연구(보청천을 중심으로). 석사학위논문, 수원대학교.
 충청남도 (2004) 매곡천 하천정비기본계획보고서, 충청남도.
 최현, 이상진(2006) 지형학적순간단위도를 이용한 미계측 소유역의 한계유출량산정 검증. **한국 GIS 학회지**, 한국 GIS 학회, 제14권, 제1호, pp.15-27.
 허준행, 이영석, 신흥준, 김경덕 (2007) 우리나라 강우자료의 지역빈도해석 적용성 연구(I) : 확률강우량 산정. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권 제2호, pp.101-111.
 Bhaskar, N.R., French, B.M. and Kyiamah, G.K. (2000) Characterization of flash floods in Eastern Kentucky. *Journal of hydrologic engineering*, Vol. 5, No. 3, pp.327-331.

◎ 논문접수일 : 10년 05월 17일
 ◎ 심사의뢰일 : 10년 05월 18일
 ◎ 심사완료일 : 10년 06월 03일