

## 유출수문곡선의 특성을 이용한 돌발홍수 특성분석

Analyis of the Characterization of Flash Floods by quantifying the characteristics of the Runoff hydrograph

김병식\* / 김형수\*\* / 최규현\*\*\*

Kim, Byung Sik / Kim, Hung Soo / Choi, Kyu Hyun

### 요    지

지금까지 돌발홍수는 주로 강우의 시공간적인 특성들을 고려한 기후학적 측면에서 관심을 가지고 연구가 진행되어 왔을 뿐 유출의 시각에서 돌발홍수를 평가하기 위한 노력은 매우 미흡하였다고 할 수 있다. 본 연구의 목적은 Bhaskar 등(2000)의 연구를 우리나라에 적용하여 유출수문곡선에 의해 돌발홍수를 설명하고, 다른 홍수사상과 돌발홍수 사상을 구별하고자 하는데 있다. 즉, 유출수문곡선의 특성을 이용해 홍수사상에 대한 돌발홍수지수(flash flood index)를 산정함으로써 돌발홍수의 심각성 정도를 정량화하고자 하였다. 이를 위해 본 논문에서는 한강유역의 과거 101개의 홍수사상에 대해 돌발홍수의 상대심도(relative severity)를 파악하기 위하여 돌발홍수지수를 산정하였으며 또한, 2006년 7월의 집중호우에 의해 발생한 홍수사상의 돌발홍수 심도를 시공간적으로 정량화하였다. 분석 결과, 한강유역의 다른 지역에 비해 강원도 지역의 홍수 유출수문곡선들이 돌발홍수 심도를 크게 나타내었으며 중랑천 등과 같은 도시유역에서도 돌발심도가 크게 나타남을 확인 할 수 있었다. 2006년 7월 집중호우에 의한 한강유역의 돌발홍수지수를 7월 전반기, 중반기 그리고 하반기로 나누어 시공간적 공간분포를 분석한 결과, 7월 전반기의 경우 서울 주변지역의 돌발심도가 크게 나타났으며 7월 중반기의 경우 강원도 지역의 돌발홍수 심도가 크게 나타났다.

**핵심용어 :** 돌발홍수, 돌발홍수지수, 유출수문곡선, 상승 곡선 기울기, 홍수량 비, 홍수 반응시간

### 1. 서 론

최근 지구온난화, 엘니뇨 및 라니나 등 지구환경 변화에 따른 기후변화의 영향으로 짧은 시간에 매우 높은 강도를 가진 이상호우에 의한 많은 인명과 재산피해를 초래하고 있으며 더 이상 이상호우는 이상 현상이 아닌 우리나라의 기상특성으로 자리를 잡아 가고 있다. 금년에도 어김없이 태풍과 집중호우로 인한 홍수피해가 발생하였으며 2006년 7월 14일부터 20일까지 전국적으로 내린 집중호우로 인해 35명의 사망자와 13명의 실종자가 발생하는 등 큰 피해를 입었다. 피해의 규모를 보면, 태풍 루사와 매미에 의한 홍수피해에 비해 그 심각성이 결초 뒤지지 않는다고 할 수 있다. 이 중 대부분의 피해는 강원도 지역에서 발생 하였으며 인명피해는 사망 29명, 실종 11명으로 전국피해의 약 88%, 재산피해는 약 1조 6천억 원으로 전국피해의 약 94%를 나타내었다. 이러한 원인으로는 집중호우로 인한 돌발홍수로 볼 수 있다. 돌발홍수는 소유역 규모의 좁은 지역과 급경사지역에서 짧은 지속시간과 집중적인 강우강도에 의해 발생하고, 빠른 유속과 토사를 동반하기 때문에 빠른 수문반응으로 홍수를 대비할 수 있는 시간이 부족한 것이 특징으로 강원도 지역은 대부분이 산악 지역으로써 지속적인 돌발홍수에 의한 재해에 적합한 환경을 제공하고 있다.

이처럼 1990년대 후반 이후 돌발홍수는 우리나라의 가장 빈번한 자연 재해 중 하나가 되었으며, 정부는 홍수 피해로부터 국민의 재산과 생명을 보호하기 위하여 구조물적인 그리고 비구조물적인 예방대책을 세우고 있다. 현재 건설교통부는 일반적으로 작은 지역에서 발생하여 빠른 홍수파의 전달 속도를 갖는 돌발홍수를 예보할 수 있는 돌발홍수 예보 시스템을 개발 하고 있는 중이다. 그러나 우리나라에서는 돌발홍수 사상에 대한 유출 특성에

\* 정회원·공학박사·한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 (E-mail : [hydrokbs@kict.re.kr](mailto:hydrokbs@kict.re.kr))

\*\* 정회원·공학박사·인하대학교 토목공학과 부교수 (E-mail : [sookim@inha.ac.kr](mailto:sookim@inha.ac.kr))

\*\*\* 정회원·공학박사·한강홍수통제소 하천정보센터 토목연구사·공학박사(E-mail : [khchoi@mocrt.go.kr](mailto:khchoi@mocrt.go.kr))

대한 분석이 연구된 바가 거의 없었다. 예를 들면, 돌발홍수 수문곡선이 다른 홍수 수문곡선과 얼마나 다른가에 대한 의문은 연구되어야 할 부분으로 남아있다. 앞에서 언급한 바와 같이 본 연구의 목적은 유출수문곡선을 이용하여 돌발홍수를 설명하는 것과 다른 홍수사상과 돌발홍수를 구별하는 방법을 제시하는데 있다. 따라서 본 연구에서는 유출수문곡선으로부터 돌발홍수에 대한 홍수지수를 산정함으로써 돌발의 심각성 정도를 정량화하고자 한다.

## 2. 돌발홍수지수

개릴라성 집중호우로 인한 돌발홍수의 원인을 분석하기 위해서는 우선 강우강도, 지속시간, 강우분포 등에 대한 분석이 선행되어야 하고 이를 근거로 유출특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 그러나 우리나라의 경우 돌발홍수 예보를 위한 시스템 구축에 대한 연구는 계속되고 있으나 정작 중요한 돌발홍수의 유출특성에 대한 연구는 전무한 상황이다. 올해와 같이 강원도 지역의 홍수피해의 특성이 기존의 대 하천 홍수가 아니 강원도 산악 지역을 중심으로 발생한 돌발홍수로 보는 견해가 많은 지금, 돌발홍수의 유출특성에 대한 연구가 매우 필요한 시점이라고 판단된다.

본 논문에서는 유출수문곡선의 형태의 특성 묘사에 근거하여 유출수문곡선의 상승부 경사, 첨두홍수량, 지체시간을 고려하여 각각의 홍수 사상에 대하여 “돌발홍수지수”를 정의하였다. 상승곡선의 기울기 ( $K$ ), 홍수량비 ( $M$ ), 지체(응답)시간 ( $TP$ )와 같은 특성치들이 홍수사상을 요약하기 위하여 사용되었으며, 각각은 그림 1과 같다. 이들 중 두 개의 값이 단위를 가지고 있기 때문에 각각의 값을 식(3), (5) 그리고 (6)를 이용하여 지수화 하였다. 돌발홍수지수( $RF$ )는 식 (7)과 같이 각각  $K$ ,  $M$ ,  $TP$ 의 특성치를 요약한 세 개의 상대 심도 요소들로 산정된다. 본 절에서는 각각의 특성치와 지수화 과정을 다음에 자세히 설명하였다.

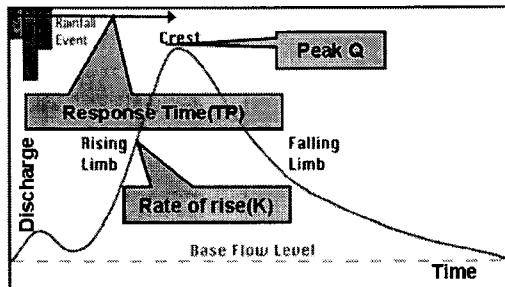


그림 1. 홍수수문곡선의 구조

### 2.1 홍수수문곡선의 상승부 경사( $k$ )

홍수수문곡선의 상승곡선은 식 (1)과 같은 형태의 일반적인 지수 식으로 나타낼 수 있으며  $k$  값은 식 (2)를 이용하여 산정할 수 있다.

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

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

여기서,  $Q_0$  : 초기 유량

$Q_t$  : 첨두까지 시간  $TP$ 에 가까운 시간  $t$ 에서의 유량

$K$  : 상승곡선 기울기 ( $\text{day}^{-1}$ )

$t$  : 시간 (day)

$$RK = \frac{K_i - K_{\min}}{K_{\max} - K_{\min}} \quad (3)$$

기본적으로 유출곡선의 상승곡선 기울기는 홍수 수문곡선의 상승부의 경사도 값이다. 따라서 식 (1)에서  $k$  값이 상승하면  $t$  시간 후에 엄청난 크기의 홍수량이 발생하게 되며 하도에 큰 영향을 미치게 되어 돌발홍수가 발생할 수 있다는 점을 짐작 할 수 있다. 또한,  $k$ 는 그 지역의 지형학적 특성을 내포하고 있다고 할 수 있다.

## 2.2 홍수량 비( $M$ )

홍수량 비( $M$ )는 홍수수문곡선에 대한 첨두홍수량과 장기간의 평균유량의 비이며, 평균유량과 비교하여 얼마나 큰 홍수량이 발생하였는지를 파악할 수 있는 인자이다. 우리나라의 경우 하상계수가 다른 나라에 비해 상당히 크기 때문에 매우 큰 값을 가질 것으로 판단된다. 홍수량 비를 나타내면 식 (4)와 같으며 식( 5)는 상대비를 나타낸 것이다.

$$M = Q_{\max} / Q_a \quad (4)$$

여기서,  $Q_{\max}$  : 첨두 홍수량  
 $Q_a$  : 장기간 평균 유량

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

## 2.3 홍수 응답시간 ( $TP$ )

홍수 반응(지체)시간  $TP$ 는 유출수문곡선으로부터 바로 산정 할 수 있으며, 홍수사상의 시작과 첨두 홍수량이 발생한 시간으로 정의된다. 작은 홍수 반응시간은 높은 유출 속도를 갖는 일반적인 돌발홍수와 관련이 있다. 이러한 관점에서 작은 값을 돌발홍수 반응시간은 높은 상대 심도를 갖게 된다.  $TP$ 의 단위는 시간(hr)이며 값이 작으면 작을수록 유출속도가 높은 것을 의한다.

$$RT = \frac{T_{\max} - T_i}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (6)$$

## 2.4 돌발홍수지수( $RF$ )

유출수문곡선의 상승경사( $k$ )와 홍수량 비( $M$ )는 상대적으로 큰 값을 가지면 돌발홍수에 접근하게 되지만, 응답시간( $TP$ )의 경우는 값이 작을수록 돌발홍수 현상에 접근하게 되며, 이들 인자들에 대한 상대심도지수를 합함으로써 다음과 같이 돌발홍수지수( $RF$ )를 산정할 수 있다. 식 (7) 돌발홍수지수를 산정하는 식을 나타낸 것이다.

$$RF = (RK + RM + RT) / 3 \times 100 \quad (7)$$

## 3. 적용

### 3.1 돌발홍수지수를 이용한 돌발홍수심도의 정량화

금년 7월에 발생한 호우는 7월 9일경에 시작하여 7월 29일까지 약 21일 동안 장기간에 걸쳐 한강유역과 낙

동강 유역을 중심으로 전국적으로 발생하였다. 장마 전선과 더불어 태풍 “에워니아”的 직접적인 영향과 태풍 에워니아, 빌리스, 개미의 간접 영향에 의해 집중호우가 발생하였다. 특히 강원 영서 지방의 경우 7월 14일 ~ 7월 21일에 발생한 집중호우로 인하여 극심한 피해를 입었다. 본 논문에서는 한강유역을 대상으로 금년 7월의 집중호우에 의해 발생한 홍수사상의 돌발홍수 심도를 정량하고 시공간적 발생특성을 파악하기 위하여 돌발홍수지수를 산정하였다. 분석 결과 다른 지역에 비해 상안미를 포함한 강원도 지역의 홍수수문곡선들이 돌발홍수 심도를 크게 나타내었으며 또한, 중랑천 같은 도시지역에서도 돌발심도가 크게 나타남을 확인 할 수 있었다. 2000년에 발간된 “Significant floods in the United States during the 20th century USGS measures a century of floods”(Perry, 2000) 보고서의 내용을 보면 돌발홍수는 산악지형뿐만 아니라 도시지역에서도 발생 가능성이 높다고 언급되어 있으며 위의 결과는 이러한 내용과 일치 한다고 볼 수 있다. 그림 3은 2006년 7월 집중호우에 의한 한강유역의 돌발홍수지수를 7월 전반기(7. 11 ~ 7. 14), 중반기(7. 14 ~ 7. 24) 그리고 하반기(7. 26 ~ 8. 2)로 나누어 시공간적으로 나타낸 것으로 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 7월 전반기의 경우 서울 주변지역의 돌발심도가 크게 나타났으며 이때, 서울과 고양시 일대에 홍수피해를 발생하였다. 7월 중반기의 경우 강원도 지역의 돌발홍수 심도가 크게 나타났으며 이 때 큰 홍수피해가 발생하였다. 그러나, 7월 하반기 경우 중부지방의 집중호우에 의해 안성천 유역을 포함한 여러 지역에서 홍수피해를 보였으나, 돌발홍수지수는 낮게 나타났으며 이는 돌발홍수에 의한 피해보다는 일반적인 홍수에 의한 피해임을 보여주는 것이다.

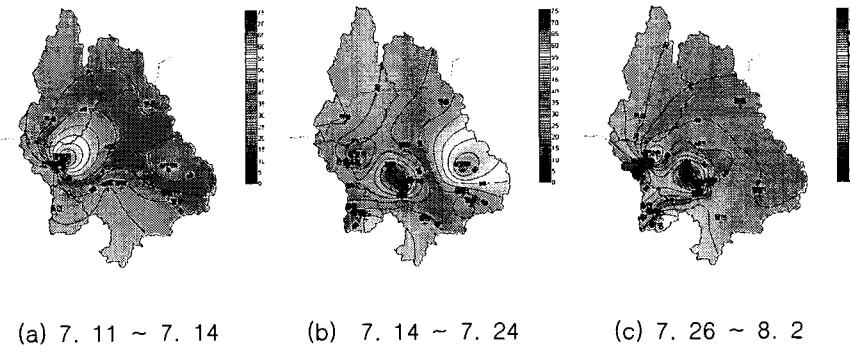


그림. 2 한강유역 돌발홍수지수의 공간적 분포(%)

### 3.2 돌발홍수지수와 유출특성의 상관분석

본 연구에서는 101개의 홍수사상에 대해, 돌발홍수지수(RF)와 유출특성의 관계를 분석하였으며 이때 산점도 분석과 선형 회귀분석을 실시하였다. 그림 3은 돌발홍수지수(RF)와 홍수수문곡선의 상승부 경사( $k$ )의 관계를 나타낸 것이며 RF에 대한 회귀식으로 표시하면 식 (8)과 같다.

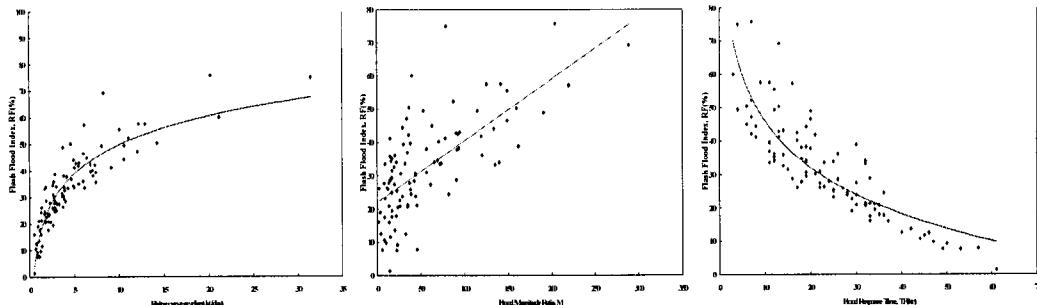
$$RF = 15.50 \ln(k) + 14.17 \quad (8)$$

그림 4는 돌발홍수지수(RF)와 홍수수문곡선의 홍수량비(M)의 관계를 나타낸 것이며 RF에 대한 회귀식으로 표시하면 식 (9)과 같다.

$$RF = 0.184(M) + 22.151 \quad (9)$$

그림 5는 돌발홍수지수(RF)와 홍수량 응답시간(TP) 관계의 관계를 나타낸 것이며 RF에 대한 회귀식으로 표시하면 식 (10)과 같다.

$$RF = -20.05(TP) + 92.15 \quad (10)$$

그림 3.  $RF$ 와  $k$  관계그림 4.  $RF$ 와  $M$  관계그림 5.  $RF$ 와  $TP$  관계

#### 4. 결 론

본 논문에서는 101개의 과거 홍수사상에 대하여 돌발홍수의 상대심도(relative severity)를 파악하기 위하여 유출수문곡선으로부터 돌발홍수지수를 산정하였으며, 이를 이용하여 금년 7월의 집중호우에 대한 한강유역의 돌발홍수 발생특성을 분석하였다. 또한, 지금까지 기상학적 측면에서 연구되어 온 돌발홍수에 대한 연구 대신 유출 측면에서 돌발홍수 수문곡선이 다른 홍수 수문곡선과 어떻게 구분 되는지를 파악하고자 하였으며 돌발홍수지수를 산정함으로써 돌발의 심각성 정도를 정량화하였다. 본 연구의 연구를 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 분석 결과 다른 지역에 비해 강원도 지역의 홍수수문곡선들이 돌발홍수 심도를 크게 나타내었으며 중랑천 등과 같이 도시유역에서도 돌발심도가 크게 나타남을 확인 할 수 있었다. 이는 돌발홍수는 산악지형뿐만 아니라 도시지역에서도 발생 가능성이 높다고 언급한 2000년 미국에 발간된 “*Significant floods in the United States during the 20th century USGS measures a century of floods*”(Perry, 2000) 보고서의 내용과 일치하는 것으로 우리나라의 경우 돌발홍수시스템의 설치가 산악지역뿐만 아니라 도시지역에도 필요하다는 것을 의미한다.
- (2) 2006년 7월 집중호우에 의한 한강유역의 돌발홍수지수를 7월 전반기, 중반기 그리고 하반기로 나누어 시공간적 공간분포를 분석한 결과, 7월 전반기의 경우 서울 주변지역의 돌발심도가 크게 나타났으며 7월 중반기의 경우 강원도 지역의 돌발홍수 심도가 크게 나타내었다.
- (3) 7월 하반기 경우 중부지방의 집중호우에 의해 안성천 유역을 포함한 여러 지역에서 홍수피해를 보였으나, 돌발홍수지수는 낮게 나타났으며 이는 돌발홍수에 의한 피해보다는 일반적인 홍수에 의한 피해임을 보여주는 것이다.
- (4) 본 논문은 돌발홍수와 연관된 유출 수문곡선의 특성의 정량화에 의한 돌발홍수 묘사에 대한 첫 시도이다. 이 분야에 대한 향후 연구에서는 더 많은 돌발홍수 사상들과 추가적인 지수화 매개변수들의 포함은 돌발홍수를 다른 홍수 사상들로부터 구분해내기 위한 지수 사용에 관련된 더 명확한 정의의 개발을 위해 필요하다. 비록, 돌발홍수지수 ( $RF$ )가 돌발홍수 예측을 위한 어떠한 의미도 제공하진 않지만, 본 연구는 자연 재해의 수문학적 거동을 이해하고자 하는 첫 걸음이라고 할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- Bhaskar, N.R, French, B.M, Kyiamah, G.K. (2000), "Characterization of flash floods in Eastern Kentucky.", Journal of hydrologic engineering, Vol. 5(3), pp. 327-331