

# 국내 유역특성을 반영한 한계유출량 산정기법 개발 및 평가

## Development and Evaluation of Computational Method for Korean Threshold Runoff

조 배 군\* / 지 희 숙\*\* / 배 덕 효\*\*\*

Cho, Bae Gun / Ji, Hee Sook / Bae, Deg Hyo

### Abstract

The objective of this study is to develop and evaluate a Korean threshold runoff computation method. The selected study area is the Han-River basin and the stream channels in the study area are divided into 3 parts: natural channel and artificial manmade channel for small mountainous catchments, and main channel for master stream. The threshold runoff criteria for small streams is decided to 0.5 m water level increase from the channel bottom, which is the level that mountain climbers and campers successfully escape from natural flood damage. Threshold runoff values in natural channel of small mountainous area are computed by the results from the regional regression analysis between parameters of basin and stream channel, while those in artificial channel of small mountainous area are obtained from the data of basin and channel characteristics parameter. On the other hand, the threshold runoff values for master channel are used the warning flood level that is useful information for escaping guideline for riverside users. For verification of the threshold runoff computation method proposed in this study, three flash flood cases are selected and compared with observed values, which is obtained from SCS effective rainfall computation. The 1, 3, 6-hour effective rainfall values are greater than the corresponding threshold runoff values represents that the proposed computation results are reasonable.

**Keywords** : threshold runoff, flash flood, flash flood guidance

### 요 지

본 연구에서는 우리나라에 적합한 한계유출량 산정기법을 제안하고 이를 평가하고자 한다. 대상유역은 한강유역이며, 유역의 하도구간을 산지소하천 자연하도, 인공하도 그리고 본류하도의 3구간으로 구분하였다. 산지소하천의 경우 산지계곡의 야영객 및 등산객들의 피해를 방지하기 위해 0.5 m 수위상승을 기준으로 한계유출량을 산정하였다. 산지소하천 자연하도의 한계유출량은 유역 및 하도 매개변수 간의 지역적 회귀분석을 통해 소유역별 한계유출량을 계산하였다. 산지소하천 인공하도의 경우에는 유역 및 하도특성인자들의 지점정보를 이용하여 지점별 한계유출량을 산정하였다. 반면 하천 본류구간에서는 고수부지를 이용하는 이용객들의 인명피해를 방지하고자 하천 본류구간의 경계홍수량을 기준으로 지점별 한계유출량을 산정하였다. 산정된 한계유출량의 검증을 위해 3개의 돌발홍수사례를 수집하였으며, SCS 유효우량 방법을 이용하였다. 지속시간 1, 3, 6시간에 해당하는 유효우량이 한계유출량보다 상회하는 값을 지닌 것으로 나타나 본 연구에서 제시한

\* 세종대학교 토목환경공학과 공학석사

Ms. D., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

\*\* 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

Ms. D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

\*\*\* 교신저자, 세종대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 (e-mail: dhbae@sejong.ac.kr)

Corresponding Author, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

한계유출량 산정방법이 적절한 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 한계유출량, 돌발홍수, 돌발홍수에경보시스템

## 1. 서 론

최근 기상이변에 따라 단시간 동안의 국지적 호우에 의한 돌발홍수가 빈번히 발생하고 있으며, 이에 따른 인명피해와 재산피해가 증가하고 있는 추세이다. 그러나 국내 현업에서 사용되고 있는 강우-유출모형에 의한 홍수예경보 시스템은 강우의 실관측치를 모형의 입력자료로 요구하기 때문에 홍수도달 시간이 매우 짧은 소유역의 돌발홍수를 예보하는데는 실효성을 거두지 못하고 있는 실정이다. 따라서 돌발홍수로부터 피해를 경감하기 위해서 이를 사전에 예측할 수 있는 돌발홍수 예경보 시스템 구축과 이를 활용하는 대책수립이 요구된다.

돌발홍수 예경보시스템은 크게 기상학적 부분과 수문학적 부분으로 구성되어 있다 (백덕효와 김진훈, 2007a). 기상학적 부분은 기상예보 수치모형, 레이더 및 인공위성 영상으로부터 향후 1, 3, 6시간 등 특정 단위시간 동안의 강우량을 예측하는 부분이고, 수문학적 부분은 특정 단위시간동안 특정 유역의 소하천에 홍수가 발생하기까지 요구되는 강우량인 돌발홍수능을 계산하는 부분이다. 이는 유역면적, 경사, 하도단면의 형상 및 크기 등 유역의 수문지형학적 특성과 현재의 토양수분 상태에 따라 달라진다. 또한, 수문학적 부분에는 돌발홍수능을 결정하는데 중요한 역할을 하는 핵심 기준값인 한계유출량 값을 산정하는 과정도 포함되어 있다.

한계유출량은 토양수분이 완전히 포화된 상태에서 특정 소하천의 제방을 월류하기 시작하여 홍수를 일으키기 시작할 때의 유효우량 (effective rainfall)으로 정의된다. 특정 유역의 토양수분을 채우고 한계유출량을 초과하도록 산정된 강우 지속시간별 돌발홍수능은 기상학적 요소인 예측강우량과의 상대적인 대소를 비교하여 돌발홍수 예경보를 실시한다. 이와 같은 돌발홍수에경보의 정확도는 향후 특정시간 이내에 예상되는 강우량을 정확히 예보하는 기상부분과 수문학적 돌발홍수능을 얼마나 정확히 산정할 수 있는가에 달려있으므로, 대상지역의 수문학적 한계유출량을 정확히 산정하는 것은 매우 중요한 일이다.

미국기상청 (National Weather Service, NWS)에서는 특정 강우에 의한 돌발홍수 발생유무를 판단할 수 있는 FFG (Flash Flood Guidance) 모델을 개발하여 실무에 활

용하고 있다. FFG는 1970년대 중반 NWS에서 처음 적용한 이래 돌발홍수에경보를 위한 지표로 지금까지 사용되고 있다. 이러한 FFG 표준 알고리즘은 Sweeney (1992)에 의해 제시되었으며, Carpenter and Georgakakos (1993), Carpenter et al. (1999)은 GIS (Geographic Information System) 소프트웨어인 GRASS 기반 한계유출량 산정의 4가지 방법에 대한 특성을 여러 대상유역을 바탕으로 분석하였다. 국내에서는 김운태 등 (2002)이 평창강 유역을 대상으로 미세유역 한계유출량을 산정하기 위해 ArcView/Avenue를 이용한 GUI (Graphic User Interface) 시스템을 개발하였으며, 신현석 등 (2004)은 덕천강 유역을 대상으로 지형기후학적 단위유량도 기법을 이용하여 한계유출량을 산정하고 돌발홍수 발생에 필요한 돌발홍수 기준우량을 산정하였다. 최원희와 남평우 (2005), 최원희와 이상진 (2006)은 GIUH (Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph)와 0.5 m, 0.7 m, 1.0 m 수심에 해당하는 한계유출량을 산정하기 위해 지리정보시스템 (GIS)를 이용하였고, GIUH를 이용한 미세유역의 한계유출량 산정을 경북 갑포 및 지리산유역의 국한된 지역에 연구를 수행하였다. 김진훈과 백덕효 (2006)는 대유역인 한강유역의 한계유출량을 계산하고 돌발홍수능을 산정하여 국외 사례와의 비교연구를 수행하였다. 국내 대다수 연구는 한계유출량 추정시 제방을 월류할 때 까지 필요한 강우량을 산정하는 것을 기본으로 하였으며, 우리나라 하천의 2/3 이상이 인공하도임을 감안하지 않은 것으로 나타났다.

이에 본 연구에서는 국내 하천특성을 고려하여 우리나라 하천을 자연하도와 인공하도로 구분하고 각각의 한계유출량 산정방법을 달리하여 우리나라 유역특성에 적합한 한계유출량 산정방법을 제시하고, 그 적용성을 검토하고자 한다.

## 2. 한계유출량 산정기법

### 2.1 한계유출량의 기본개념

한계유출량 (Threshold Runoff)은 토양이 완전히 포화된 상태에서 소하천의 제방을 월류하기 시작하여 홍수를 일으키기 시작할 때의 유효우량 (Effective Rainfall)으로 정의되며, 이는 유역면적, 경사, 하도단면의 형상 및 크기

**Table 1. Method and Data Requirements for Threshold Runoff Computation**

	Flooding Flow Definition		Unit Hydrograph Options	
Options	Two-year return period flow, $Q_2$	Bankfull discharge	Snyder's synthetic unit hydrograph	Geomorphologic Instantaneous unit hydrograph
Data Required	Regional relationship for $Q_2$ (historic flow record)	Regional relationship for channel cross-sectional parameters	Regional estimates of empirical coefficients	Regional relationship for channel cross-sectional parameters

등 유역 및 하천특성에 따라 결정된다. 따라서 한계유출량은 Eq. (1)과 같이 단위도의 침투유량  $q_{PR}$  (cms/km<sup>2</sup>/cm)에 유역면적  $A$ (km<sup>2</sup>)과 유효우량  $R$ (cm)을 곱한 값이 유역 출구점에서 제방월류유량  $Q_p$ (cms)와 동일하다는 근거하에 산정할 수 있다. 즉, 단위도의 유효우량으로 인해 발생하는 직접유출 수문곡선이므로 유효우량  $R$ 은 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있으며 이는 한계유출량에 해당한다 (Carpenter et al., 1999).

$$Q_p = q_{PR} \cdot R \cdot A \quad (1)$$

$$R = \frac{Q_p}{q_{PR} \cdot A} \quad (2)$$

제방월류유량  $Q_p$ 를 결정하는 방법에는 하도단면의 특성을 이용한 Manning 공식으로 산정하는 방법과 2년빈도 홍수량을 제방월류유량으로 가정하여 산정하는 방법이 있다. 단위도의 침투유량  $q_{PR}$ 은 실측강우 및 유량자료가 존재하는 경우 단위도를 유도하여 결정할 수 있으나, 대부분의 소하천 유역인 경우 미계측 지역이므로 Snyder 방법과 같은 합성단위도를 이용하는 방법과 유역의 지형특성이나 Horton의 하천계수 등을 이용하는 지형학적 순간단위도 (Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph, GIUH)를 이용하는 방법이 있다. Carpenter et al. (1999)은 Table 1과 같이 한계유출량 산정을 위한 기본자료에 대하여 기술하였다.

## 2.2 기존 한계유출량 산정방법의 한계점

지금까지 개발된 돌발홍수예경보 시스템 중 대표적인 것은 미국 NWS의 FFG 시스템과 한국의 KoFFG 시스템이라 판단된다. 이들 두 시스템에서의 한계유출량 산정방법을 검토하여 한계점을 도출 하였다.

미국의 경우 홍수유량은 2년 빈도 홍수량을 이용하고 단위도의 침투유량은 Snyder 방법으로 계산한다 (Carpenter et al., 1999). 한계유출량 산정 시 미국의 산정방법을 그대

로 국내 유역에 적용하는 것은 무리가 있다. 그 이유는 2년 빈도 홍수량이 제방월류유량으로 적절하지 검토된 바가 없기 때문이다. 또한 우리나라 하천의 특징은 본류구간에 인공하도가 2/3 이상 차지하고 있으며, 이는 인공하도에 홍수유량을 산정함에 있어 2년 빈도 홍수량이 과소 추정된 값을 제시한다고 볼 수 있다. 따라서 KoFFG에서는 홍수유량 산정을 위하여 Manning의 제방월류유량 방법을 이용하였으며, 단위도의 침투유량은 GIUH 기법을 활용하였다. 미계측유역의 2년 빈도 홍수량 산정의 한계 및 Snyder 합성단위도 기법의 경험적 매개변수 산정의 문제점에 제약을 받지 않기 때문에 Manning-GIUH 기법을 사용하였다 (김진훈, 2007).

미국은 대부분 자연하도로 구성되어 있어 자연하도 단면으로부터 회귀식을 이용하여 제방월류유량을 산정하는 것이 가능하다. 그러나 국내의 경우 상류 소하천은 자연하도이나 상당수가 인공하도로 구분되어 있으므로 자연하도 단면으로부터 결정된 회귀식을 이용하여 제방월류유량을 산정할 경우 낮은 상관성을 가지는 회귀식을 사용하게 된다. 또한 산지유역의 인명피해를 최소화하기 위하여 홍수유량을 제방월류유량으로 산정하는 것은 적절하지 않다고 판단된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 우리나라 하도특성을 반영한 한계유출량 산정기법이 요구된다.

## 2.3 국내실정에 적합한 한계유출량 산정기법 개발

본 연구에서는 한강유역의 하천을 산지 소하천의 자연, 인공하도 및 본류하도 3구간으로 나누고 제방월류유량 대신 위험유량을 이용하여 한계유출량을 산정하고자 한다. 여기서 위험유량이란 단순히 제방월류유량을 나타내는 것이 아니라 특정하천에 인명피해를 요구하는 유량으로 정의하였다.

첫째, 산지 소하천의 자연하도일 경우 위험유량을 산정하기위해 Manning식과 GIUH를 이용하여 한계유출량을 산정한다. 이를 위해서는 GIS Arc/Info를 이용하여 한강

유역을 미세 소유역으로 구분한다. 그리고 GIS Hydrotool 을 이용하여 미세 소유역 별 유역면적, 유로연장, 하도경 사에 대한 지형자료를 추출한다. 특정지점에서 0.5 m 수 심 상승을 기준으로 하폭 (B), 수리수심 (H), 국지하천경 사 (S)와 유역면적 (A), 하도길이 (L), 하도경사 (S)의 회 귀식을 산정하고, 이를 Manning식을 통해 위험유량을 산 정한다. 그리고 앞서 산정한 6개의 유역 및 하도특성인자 를 이용하여 GIUH를 유도함으로써 미세 소유역별 한계 유출량을 산정한다. 둘째, 산지소하천 인공하도의 산정 방 법은 해당 지점의 유역 및 하도특성인자를 이용하여 지점 에 대한 한계유출량을 산정한다. 이 또한 산지 소하천의 위험수위인 0.5m를 기준으로 한 하폭, 수리수심, 국지하 천경사를 산정하고 유역면적, 유로연장, 하도경사 등의 인 자를 추출하여, Manning식과 GIUH를 이용하여 지점별 한계유출량을 산정한다. 셋째, 본류구간은 우선 위험유량 을 설계홍수위의 50%인 경계홍수위에 해당하는 유량으 로 설정하였으며, 한강유역의 국가, 지방 1:2급 하천정비 기본계획보고서에 수록된 경계홍수위에 해당하는 홍수량 값을 추출한다. 본류구간에서는 지점별 경계홍수량에 해 당되는 값을 위험유량으로 보고 이를 GIUH의 단위도 점 두유량으로 나누어 지점별 한계유출량을 산정한다. Fig. 1 은 한국형 한계유출량 산정기법 개발을 위한 방법론을 모 식적으로 나타낸 그림이다.

### 3. 한계유출량 산정

#### 3.1 대상유역 선정 및 지형자료 추출

본 연구에서는 우리나라 제1권역인 한강유역을 대상유 역으로 선정하였다. 한강유역은 북위 36° 30'~38° 55', 동경 126° 24'~129° 02'의 한반도 중앙부에 위치하고 있 으며, 유역면적 34,473 km<sup>2</sup> (임진강유역 8,118 km<sup>2</sup> 포함 및 북한지역 8,455 km<sup>2</sup> 포함), 유로연장 481.7 km, 유역평균 폭 55.8 km, 유역형상계수 0.119인 남한 제 1의 하천으로 서 하천형상은 수지상 (dendritic)과 선형 (fanshape)이 혼 합된 복합상 (multiple type) 유역으로 전 국토면적의 약 23%를 차지한다.

한강유역의 소유역 경계를 추출하기 위하여 30 m DEM 자료를 이용하였으며, 수문학적 해석에 필요한 유역 특성 인자를 산출하였다. Fig. 2는 ArcGIS를 활용하여 유역기 반 한계유출량 계산을 위해 산출된 미세 소유역 분할도 및 상세 하천도를 나타낸다. 소유역의 경우 그 면적이 0.01~ 224 km<sup>2</sup>의 범위를 가지고 있으며, 한강유역 전체를 931개 의 소유역으로 구분하였다. Fig. 3은 본 소유역별 매개변 수인 면적, 하도경사의 상대빈도 분포를 나타낸 것이다. 유역면적 평균 및 표준편차가 각각 28.04 km<sup>2</sup>, 21.99 km<sup>2</sup> 로 계산되었고 15~30 km<sup>2</sup> 범위에서 가장 높은 빈도를 보 이다. 하도경사의 경우 평균이 0.0495, 분산이 0.0083으로

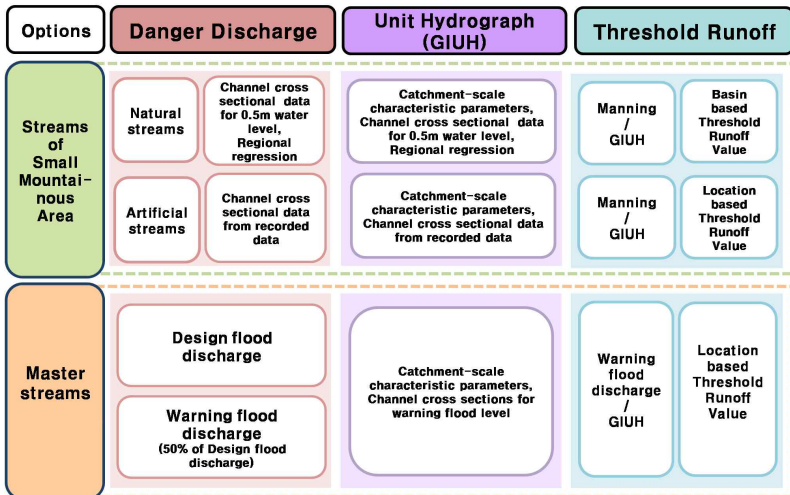


Fig. 1. Computation Methods for Korean Threshold Runoff

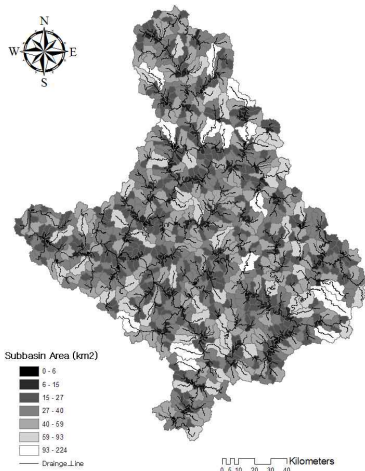


Fig. 2. Delineated Subbasins and Stream Line for Threshold Runoff Computation

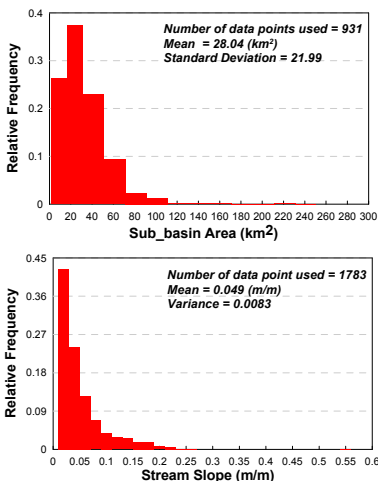


Fig. 3. Relative Frequencies For the Subbasin Parameters

나타났다.

하도단면자료의 경우, 산지 소하천단면자료는 김진훈(2007)의 연구에서 제시되었던 자료를 사용하고, 분류구간

의 단면자료는 하천관리지리정보시스템(<http://www.river.go.kr/>)에서 제공하고 있는 하천정보기본계획보고서를 이용하여 한강유역의 분류구간 하도단면자료를 수집하였다. 수자원관리 정보시스템인 WAMIS (<http://www.wamis.go.kr/>)에서 제공하는 하천정보와 한강홍수통제소에서 제공하는 한국하천일람 자료를 기준으로 하여 분류구간의 238개의 지점에 대한 정보, 276개 종점에 대한 정보로부터 총 514개 지점에 대한 하도 및 유역특성자료를 수집하였다.

### 3.2 하도 및 유역 매개변수를 이용한 지역적 회귀 분석

산지 소하천 자연하도의 위험유량 ( $Q_d$ ) 및 단위도의 침투유량 ( $q_{PR}$ ) 계산을 위해서는 수집된 자료로부터 회귀분석을 통한 지역화 분석이 필요하다. 본 연구에서는 산지 소하천 자연하도단면에 한계유출량을 결정하기위해 0.5 m 수심 상승을 기준으로 한 하폭 ( $B$ ), 수리수심 ( $H$ ), 국지하천경사 ( $S_c$ ) 등을 산정하였다. 이들 매개변수는 유역매개변수인 유역면적 ( $A$ ), 하천연장 ( $L$ ), 하천경사 ( $S$ )를 통해 지역화되며, 유역매개변수는 수치지도모델 (DEM)인 수치지형도 등을 활용하여 결정할 수 있다. 회귀분석은 통계학적 소프트웨어인 SPSS로부터 수행되었으며 유역매개변수를 이용한 회귀분석 결과의 최적 관계식은 Table 2와 같다. 회귀분석 시 신뢰수준은 95%를 적용하였고, 결정계수 (Coefficient of Determination)  $R^2$ 을 확인함으로써 최적관계식을 도출하였다. 결정계수의 1차함수 ( $R$ )를 산정한 결과 하폭 ( $B$ ), 수리수심 ( $H$ ), 국지경사 ( $S_c$ )에 대해 각각 87%, 61%, 73%로 계산되었다. 김진훈(2007)에서 제안한 회귀식보다는 높은 상관성을 가지나 여전히 수리수심에 대한 회귀식의 결정계수가 다소 낮게 산정되었으며, 보다 많은 자연형 하도단면 자료가 확보된다면 추후 회귀식을 개선해야 할 것이다.

### 3.3 산지소하천의 자연하도 한계유출량 산정

한강 931개 소유역의 유역특성자료 (유역면적, 하천연장, 하천경사)의 지역적 회귀분석 결과로부터 구분된 각 소유역의 경우 지속시간별 한계유출량은 Manning 및 GIUH 기법을 활용하여 계산 가능하다. 자연하천에서의 위험유량 ( $Q_d$ )은 Eq. (4)와 같은 등류상태의 흐름을 해석하는 Manning의 공식으로부터 산정할 수 있다.

$$Q_d = \frac{A_b \cdot R_b^{\frac{2}{3}} \cdot S_c^{0.5}}{n} \quad (4)$$

**Table 2. Regression Relationships between Basin and Channel Parameter**

Parameter	Best-Fit Regression Equation	Coefficient of Determination, $R$ (%)	No. of Cases
$B$	$= 15.776A^{0.369} S^{-0.080}$	87	46
$H$	$= 2.39A^{-0.920} L^{1.174} S^{0.748}$	61	46
$S_c$	$= 2.44A^{-0.278} L^{-0.769}$	73	46

Units:  $B[m]$ ;  $H[m]$ ;  $S$  &  $S_c$ [dimensionless];  $A[km^2]$ ;  $L[m]$

여기서,  $A_b$ 는 통수단면적 ( $m^2$ ),  $R_b$ 는 통수반경 (m),  $S_c$ 는 하도바닥경사 (무차원),  $n$ 은 Manning의 조도계수이다. Eq. (4)에서 필요한 매개변수는 회귀분석을 통해 추정된 하도 단면 매개변수로부터 구할 수 있다.

순간단위도 (Instantaneous Unit hydrograph, IUH)란 어떤 유역에 단위유출우량이 순간적으로 내릴 때 유역출구를 통과하는 유량의 시간적 변화를 나타내는 수문곡선을 의미한다. 일반적인 단위도는 반드시 단위유출우량의 지속시간과 동일한 지속시간을 가지지만 IUH는 지속시간이 영 (zero)에 가까운 단위유출우량에 의한 것이므로 지속시간을 갖지 않는다. 이러한 가정은 실제로 있을 수는 없지만 수문곡선해석에 사용되는 가상의 개념이다. GIUH는 지형학과 수문학의 이론적 접근을 통해 GIS와 지형도에서 구할 수 있는 하상지형인자를 이용하여 IUH를 유도한 것이다. GIUH를 이용할 때 유역은 Horton과 Strahler의 차수법칙을 따른다고 가정하고, 아울러 유역의 지형학적 인자는 다음과 같은 관계가 있다 (Rodríguez and Valdes, 1979).

$$\text{하천수 법칙: } \frac{N_w}{N_{w+1}} = R_B$$

$$\text{하천길이 법칙: } \frac{L_w}{L_{w-1}} = R_L$$

$$\text{하천면적 법칙: } \frac{A_w}{A_{w-1}} = R_A$$

여기서,  $R_B$ ,  $R_L$ ,  $R_A$ 는 각각 하천분지율 (Bifurcation Ratio), 하천연장비 (Stream Length Ratio), 하천면적비 (Basin Area Ratio)이며,  $w$ 는 하천의 차수,  $N_w$ ,  $L_w$ ,  $A_w$ 는 각각  $w$  차수의 하천의 수, 평균하천길이, 평균유역면적을 나타낸다 (Bras, 1990). Rodríguez and Valdes (1979)는 IUH의 침투시간과 침투유출량을 다음과 같이 나타내었다.

$$t_p = C_3 I^{0.4} \tag{5}$$

$$q_{pR} = \frac{C_4}{I^{0.4}} \tag{6}$$

여기서,  $C_3$ ,  $C_4$ 는 단위환산 계수이며, English 단위일 경우 0.576과 0.884의 값을 가진다. 또한  $I$ 는 Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = \frac{L^{2.5}}{i A R_L \left[ \frac{S_c^{0.5}}{n B_b^{2/3}} \right]^{1.5}} \tag{7}$$

여기서,  $L$ 은 하천길이 (km),  $i$ 는 강우강도 (cm/hr),  $A$ 는 유역면적 ( $km^2$ ),  $R_L$ 은 하천연장비,  $S_c$ 는 하도바닥경사,  $n$ 은 Manning의 조도계수이며,  $B_b$ 는 하폭 (m)이다. 이들 매개변수는 위험유량  $Q_d$  산정시 사용된 값들을 동일하게 적용하였다.

Rodríguez-Iturbe et al. (1982)은 순간단위도의 침투유출량과 침투시간을 지속시간  $t_p$ 의 등가 초과강우 (uniform rainfall excess)에 대응하는 단위도의 침투유출 및 침투시간으로 변환하였다.

$$Q_p = 2.42 \frac{i A t_R}{I^{0.4}} \left( 1 - \frac{0.218 t_R}{I^{0.4}} \right) \tag{8}$$

$$t_{pR} = 0.585 I^{0.4} + 0.75 t_R \tag{9}$$

여기서,  $R = i t_R$  이 주어진다면 Eq. (8)은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_p = 2.42 \frac{R A}{I^{0.4}} \left( 1 - \frac{0.218 t_R}{I^{0.4}} \right) \quad (t_R \leq t_b) \tag{10}$$

$$Q_p = \frac{R}{t_R} A \quad (t_R > t_b) \tag{11}$$

Eq. (10) 왼쪽 항인  $Q_p$ 에는 Manning 공식으로부터 산정된 위험유량 ( $Q_d$ )이 대입되어 지속시간별 산지소하천의 자연하도에 대한 한계유출량  $R$ 을 계산할 수 있다. 단, 강우 지속시간 ( $t_R$ )이 순간단위도의 기저시간 ( $t_b$ )보다 오래 지속될 경우, 한계유출량은 Eq. (11)과 같이 산정된다.

Fig. 4는 0.5 m 수심의 상승을 고려한 1, 3, 6시간 단위의 한계유출량 계산결과를 나타낸 것이며, Fig. 5는 지속시간별 한계유출량의 빈도해석결과이다. 지속시간 1시간

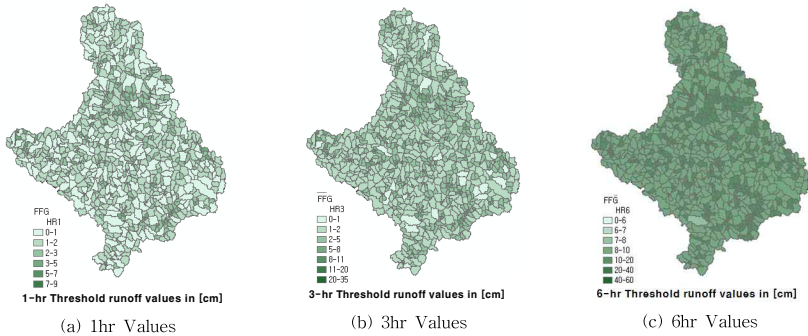


Fig. 4. Threshold Runoff with Effective Rainfall All Duration Times

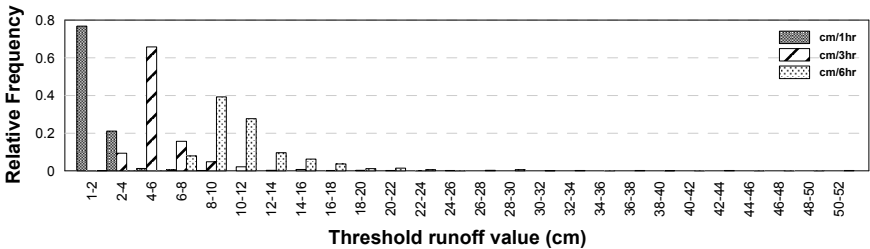


Fig. 5. Relative Frequencies of the Threshold Runoff Values

단위의 한계유출량 값은 1.29~8.52 cm/1 hr의 범위로 계산되었고 대부분의 소유역들은 1~2 cm/1 hr의 한계유출량 값을 가진다. 또한 지속시간 3시간의 한계유출량 값은 3.88~25.50 cm/3 hr의 범위를 보이고 평균이 5.58 cm/3 hr로 나타났다. 지속시간 6시간의 한계유출량 값은 7.77~51.11 cm/6 hr의 범위를 보이고 평균은 11.38 cm/6 hr이다. 이들 한계유출량 계산결과는 2010년 8월 8일에 신불산과 간월산 등의 산악지역에 1시간동안 1.9 cm의 집중호우로 작정 일대의 수천명의 피서객들이 불어난 물을 건너지 못해 119구조대의 구조를 요청한 사실로 살펴볼 때, 본 연구에서 산정된 1시간의 한계유출량 평균값인 1.47 cm/1 hr 값은 적절하다고 간접적으로 판단할 수 있을 것이다.

### 3.4 산지소하천의 인공하도 한계유출량 산정

본 연구에서는 산지소하천의 인공하도 구간 및 분류구간에 대한 한계유출량 값을 산정하였다. 산지 인공하도에 대해서 자연하도의 회귀식을 이용하지 않은 이유는 하천

마다 설계빈도가 다르고 이에 따라 하도특성 또한 상이하기 때문에 하도특성인자를 회귀식으로부터 산정하는 것은 무리가 있다고 판단하였다.

산지소하천의 인공하도 지점별 유역특성과 하도특성을 이용하여 Manning식을 통해 위험유량을 결정하게 되며, GIUH를 통하여 미세소유역별 단위도의 침투유량과 침투유량의 발생시간을 계산한다. 앞서 계산된 위험유량을 산지소하천 자연하도와 같은 방법으로 단위도의 침투유량으로 나눔으로써 산지소하천 인공하도에서의 한계유출량을 산정하였다. Fig. 6의 산지 소하천의 인공하도에 0.5m 수심 상상을 기준으로 한 지속시간 1시간 단위의 한계유출량 값은 0.46~8.74 cm/1 hr의 범위로 나타났고, 인공하도 지점에 대한 평균은 4.42 cm/1 hr의 값을 가진다. 또한 지속시간 3시간의 한계유출량 값은 1.37~19.93 cm/3 hr의 범위를 보이며, 평균은 8.32 cm/3 hr의 값을 가진다. 마지막으로 지속시간 6시간의 한계유출량 값은 2.74~39.87 cm/6 hr의 범위를 보이고 평균은 11.20 cm/6 hr이다.

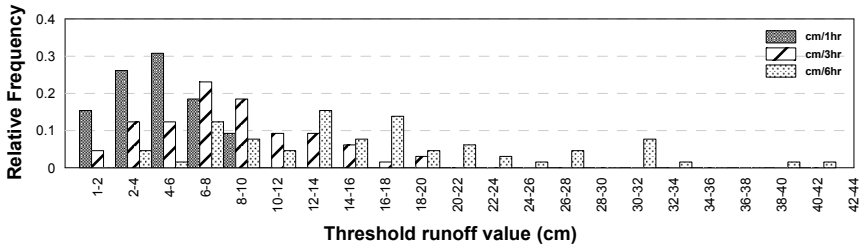


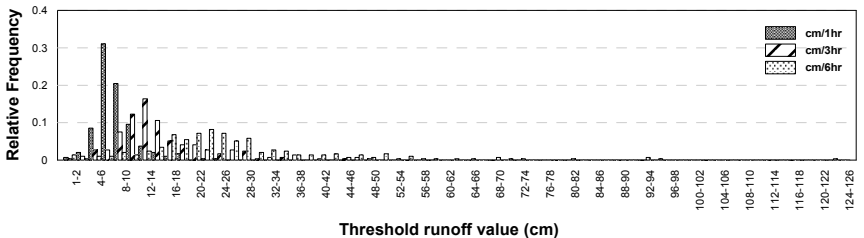
Fig. 6. Relative Frequencies of the Threshold Runoff Values

### 3.5 본류구간 한계유출량 산정

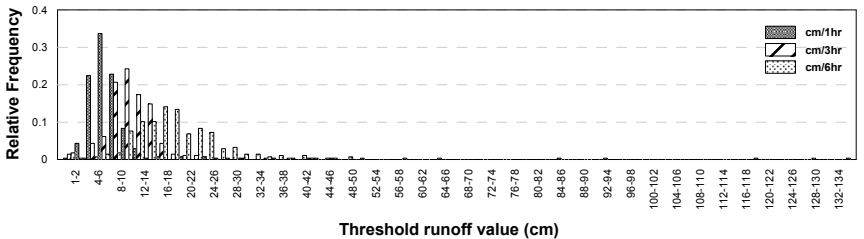
본류구간의 지속시간 별 한계유출량 값은 위험유출량 설계홍수량의 50%에 해당하는 경계홍수량으로 적용하여 계산하였다. Fig. 7(a)의 본류구간의 지점별 기점 경계홍수량을 기준으로 한 한계유출량 결과로써 지속시간 1시간 단위의 기점 한계유출량은 2.07~23.32 cm/1 hr의 범위를 보이며 평균은 6.62 cm/1hr의 값을 가진다. 또한 지속시간 3시간의 한계유출량은 3.12~60.75 cm/3 h의 범위를 보이고, 평균은 14.22 cm/3hr의 값을 가진다. 지속시간 6시간의 한계유출량 값은 6.23~121.50 cm/6 hr의 범위를 보

이고 평균은 25.7 cm/6hr이다. Fig. 7(b)는 종점 경계홍수량을 기준으로 지속시간 1시간 단위의 종점 한계유출량은 2.59~28.74 cm/1 hr의 범위로 계산되었고 평균은 8.2 cm/1 hr의 값을 가진다. 또한 지속시간 3시간의 기점 한계유출량은 4.09~59.29 cm/3hr의 범위를 보이고 평균값은 12.88 cm/3 hr로 계산되었다. 지속시간 6시간의 한계유출량은 6.23~118.58 cm/6 hr의 범위를 보이고 평균은 21.99 cm/6hr이다.

이들 한계유출량 계산결과는 2010년 9월 21일에 발생한 폭우로 경기 여주군 여주읍 일대에 본류구간에 제방 호안블록 파괴 및 신진교 붕괴 등의 피해가 발생한 사례



(a) Starting Point of Master Stream



(b) Ending Point of Master Stream

Fig. 7. Relative Frequencies of the Threshold Runoff Values



의 강우량을 검토한 결과 지속시간 1시간 최대강우량은 9.90 cm, 지속시간 3시간 최대강우량은 18.2 cm, 지속시간 6시간 최대강우량 21.10 cm으로 나타났다. 이는 본류구간에 산정된 한계유출량 값이 적절하다는 것을 간접적으로 판단할 수 있다.

#### 4. 한계유출량 검증

토양수분이 완전히 포화된 상태에서 위험유량에 도달하는데 까지 필요한 강우량을 나타내는 한계유출량은 개념적인 유출량이며 실측자료가 존재하지 않는다. 한계유출량의 정확도를 검증하기 위해서는 한계유출량의 개념을 명확히 이해할 필요가 있다. 한계유출량은 유효우량의 개념을 포함하고 있으며, 토양수분이 완전히 포화되었다는 가정을 가지고 있다. 이를 적절히 검증하기 위해서는 SCS 유효우량 산정방법을 이용할 수 있을 것이다.

한계유출량 검증을 위해 돌발홍수 사례를 조사하여 해당 호우사상의 관측강우 자료를 수집한다. 한계유출량 개념에 부합시키기 위해 SCS 유효우량 산정 시 이용하는 선행강우조건을 AMC-III 조건으로 적용하여 1, 3, 6시간 지속시간 별 유효우량을 산정한다. 1, 3, 6시간 별 누가우량과 최대잡재보유수량으로부터 지속시간 별 유효우량을 계산할 수 있다. 지속시간 별 한계유출량과 유효우량을 비교하여 유효우량이 한계유출량 값을 상회하면 한계유출량이 적절하게 산정된 것으로 평가할 수 있다. 돌발홍수가 발생한 사례를 검증사상으로 선정할 경우 선정된 호우사상에 대한 유효우량은 돌발홍수를 유발시키는데 기준값이 되는 한계유출량 값보다 큰 유효우량이 발생해야 한다. 반대로 한계유출량 값보다 작은 유효우량은 돌발홍수를 유발시키지 못한 것으로 평가되므로 적절하지 않은 것으로 평가할 수 있다.

##### 4.1 검증사례 수집

본 연구에서 산정한 한계유출량 값의 검증을 위하여 1991년부터 2010년 기간에 신문과 뉴스에 실린 산지 계곡에서 발생한 돌발홍수 사건들을 중심으로 사례를 수집하

였다. 현재 돌발홍수의 정의가 정량적으로 이루어지지 않은 실정이므로 돌발홍수의 발생 기준은 맵스컴에서 돌발홍수라 보도한 사례를 기준으로 하였다. 구간 별 적용성을 검토 할 경우 산지소하천 및 본류구간으로 나누어 한계유출량을 비교해야 할 필요가 있으나 본류구간에 돌발홍수 발생사례는 드물며, 관측 자료의 부재로 인하여 검증 사상이 어려운 실정이다. 따라서 산지 소하천에 강우 자료만을 이용한 검증 사상을 선정하였다. 수집한 결과는 Table 3과 같으며 다음 3개의 사례에 대한 한계유출량 평가를 하고자 한다.

##### 4.2 한계유출량 적절성 분석

Fig. 8은 수집한 3개의 사례에 대한 유효우량 산정결과이다. 유효우량과 한계유출량의 비교는 유효강우의 동일한 지속시간별로 수행해야한다.

Fig. 8(a)에서는 속사천 유역에 대한 유효우량 발생시점과 산지계곡 부근에서의 구조요청 시점을 도시하였다. 속사천 유역의 구조 요청시간은 대략 유효우량 발생시점에서 3시간 후인 1997년 8월 3일 오후 3시로 나타났다. 따라서 지속시간 3시간에 해당하는 한계유출량과 유효우량을 비교 하는 것이 적절하다. 속사천 유역의 지속시간 별 한계유출량은 4.55 cm/1 hr, 6.36 cm/3 hr, 7.81 cm/6 hr로 산정되었다. 3시간 지속시간에 해당하는 유효우량은 2.19 cm로 지속시간 3시간에 해당하는 한계유출량 6.36 cm보다 적은 값을 나타냈다. 앞서 설명한 한계유출량 검증방법에 의하면 산정된 한계유출량 값은 적절하지 않다. 그러나 속사천 검증사상의 경우 Fig. 8(a)에서 볼 수 있듯이 유효우량 발생시점은 12시 이후이며, 돌발홍수의 직접적인 원인이 되는 호우는 11시에서 12시 사이에 발생한 것으로 보아 강우량의 대부분이 초기 손실량으로 간주되어 유효우량의 값이 한계유출량보다 적게 산정된 것으로 사료된다.

Fig. 8(b)의 팔송천에서는 유효우량 발생시점을 기준으로 약 6시간 이후인 오전 9시 30분에 구조요청이 발생하였으므로 지속시간 6시간의 유효우량과 한계유출량 값을 비교하였다. 팔송천 유역의 지속시간 별 한계유출량은 1.62

Table 3. Case of Flash Flood

No.	Stream	Administrative District	Occurrence Time
1	Soksa	Imokjeong-ri, Yongpyeong-myeon, Pyeongchang-gun, Gangwon-do	1997. 8. 3.
2	Palsong	Bongyang-eup, Jechein-si, Chungcheongbuk-do	2007. 8. 5.
3	Soyang	Hongmun-ri, Yeouju-eup, Yeouju-gun, Gyeonggi-do	2010. 9. 21.

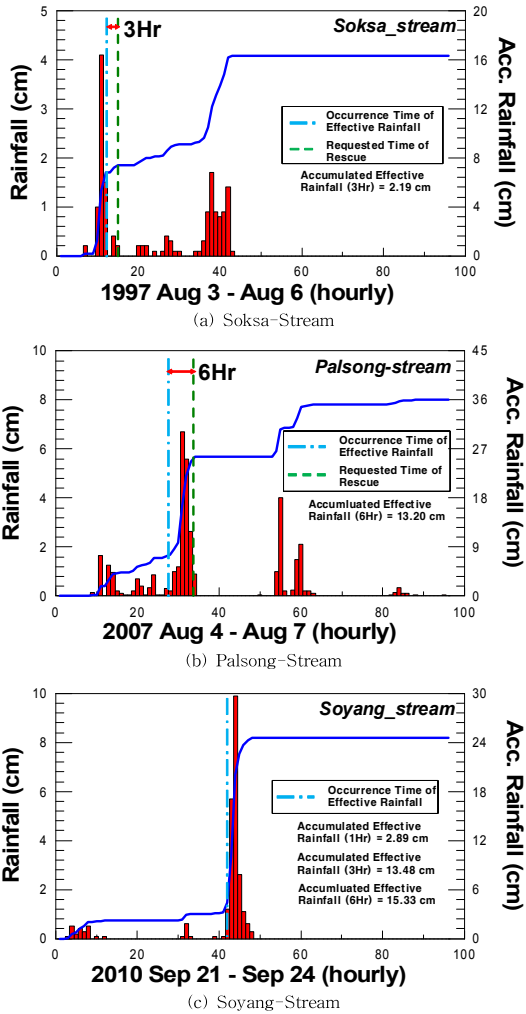


Fig. 8. Computed Effective Rainfall for Verifying Threshold Runoff Values

cm/1 hr, 4.86 cm/3 hr, 9.72 cm/6 hr로 산정되었다. 지속시간 6시간에 해당하는 유효우량은 13.21 cm로 지속시간 6시간에 해당하는 한계유출량 9.72 cm보다 상회하는 값을 가짐으로 해당 유역의 지속시간 6시간에 대한 한계유출량 값은 적절하다고 판단된다. Fig. 8(c)에서는 소양천 유역

의 경우 해당 소유역에 발생한 돌발호우에 의한 피해시간이 나타나있지 않아 유효우량 발생시점으로부터 1시간, 3시간, 6시간의 유효우량과 한계유출량 값 모두 비교검토하는 것이 옳다고 판단하였다. 소양천 유역의 지속시간 별 한계유출량 값은 1.62 cm/1 hr, 4.84 cm/3 hr, 9.67 cm/6 hr

이다. 비교결과, 유효우량이 한계유출량 값을 모두 상회하는 것으로 나타났다.

돌발호우사상에 대한 검증을 실시한 결과 본 연구에서 산정한 한계유출량은 적절한 것으로 나타났다. 돌발홍수가 발생하지 않은 일반적인 호우사상을 이용한 한계유출량의 추가적인 검증이 필요한 것으로 판단되어 소양천 유역에 지난 4년간(2007~2010)의 일반 호우 사상을 선정하고 각 호우사상에 대하여 유효우량을 선정하였다. Table 4는 각 호우사상에 대하여 유효우량이 발생한 시점으로부터 1, 3, 6시간의 지속시간을 가지는 누가유효우량과 한계

유출량을 비교한 것이다. 이들을 비교한 결과 일반적인 호우사상의 유효우량은 한계유출량보다 작으므로 한계유출량은 적절하다 판단된다.

산지인공하도 및 본류구간의 한계유출량 검증을 위해 소양천유역의 돌발홍수 사례를 이용하여 해당 지점에 대한 한계유출량 값을 검증하고자 하였다. 각 지점별 한계유출량 검증결과는 Table 5와 같다. 검증결과 본류기점의 지속시간 3시간의 한계유출량 보다 유효우량이 더 큰 것으로 나타났으며, 앞서 기술한 해당사상에 발생한 피해 상황을 보았을 때 이는 적절한 것으로 판단된다. 그리고

**Table 4. Verification of Threshold Runoff Value on Non-Flash Flood Event at Natural Stream of Soyang Stream**

Event	Duration Time	Threshold Runoff (cm)	Effective Rainfall (cm)
20070806~20070809	1 hr	1.61	1.55
	3 hr	4.84	2.65
	6 hr	9.68	2.87
20080723~20080726	1 hr	1.61	0.18
	3 hr	4.84	0.77
	6 hr	9.68	7.64
20090710~20090713	1 hr	1.61	0.03
	3 hr	4.84	3.80
	6hr	9.68	9.26
20100715~20100718	1hr	1.61	0.11
	3hr	4.84	0.89
	6hr	9.68	1.66

**Table 5. Verification of Threshold Runoff Value on Non-Flash Flood Event at Artificial Stream and Main Stream of Soyang Stream**

Computed Point	Event	Duration Time	Threshold Runoff (cm)	Effective Rainfall (cm)
Main Stream (Starting Point)	20100920 ~ 20100923	1 hr	4.37	2.89
		3 hr	9.48	13.48
		6 hr	19.89	15.33
Main Stream (Ending Point)	20100920 ~ 20100923	1 hr	7.68	2.89
		3 hr	11.61	13.48
		6 hr	15.66	15.33
Artificial Stream	20100920 ~ 20100923	1 hr	50.5	2.89
		3 hr	7.27	13.48
		6 hr	14.54	15.33

앞서 비교한 바와 동일하게 산지인공 및 분류중점의 지속시간 3, 6시간에 해당하는 한계유출량 보다 유효우량이 더 큰 것으로 나타났다. 이는 해당사상에 대하여 적절한 한계유출량 값을 지닌다는 것을 의미하며, 보다 신뢰성이 있는 한계유출량 검증을 위해서 앞으로 더 많은 돌발호우 사상에 대한 기초자료를 수집하여 적절성을 검토해야 할 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 우리나라에 적합한 한계유출량 산정기법을 제안하고 이를 평가하였다. 우리나라의 하도구간을 산지소하천 자연하도, 인공하도 그리고 분류구간의 3구간으로 나누어 한계유출량을 산정하였으며, 본 연구에서 도출된 주요 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 산지 소하천 자연하도의 지속시간 1시간 단위의 한계유출량 값은 1.29~8.52 cm/1hr의 범위로 계산되었고, 대부분의 소유역들은 1~2 cm/1hr의 한계유출량 값을 가진다. 또한 지속시간 3시간의 한계유출량은 3.88~25.50 cm/3hr의 범위를 보이고, 평균이 5.58 cm/3hr로 나타났다. 지속시간 6시간의 한계유출량 값은 7.77~51.11 cm/6h의 범위를 보이며, 평균은 11.38 cm/6hr이다.
- 2) 산지 소하천 인공하도의 지속시간 1시간 단위의 한계유출량은 0.46~8.74 cm/1hr의 범위를 가지며, 인공하도 지점에 대한 평균은 4.42 cm/1hr의 한계유출량 값을 가진다. 또한 지속시간 3시간의 한계유출량은 1.37~19.93 cm/3hr의 범위를 보이며, 평균은 8.32 cm/3hr이다. 지속시간 6시간의 한계유출량은 2.74~39.87 cm/6hr의 범위를 보이고, 평균은 11.20 cm/6hr이다.
- 3) 분류구간의 지점별 기점 경계홍수량을 기준으로 한 한계유출량 산정 결과 지속시간 1시간의 기점 한계유출량은 2.07~23.32 cm/1hr의 범위를 나타내며, 평균은 6.62 cm/1hr이다. 또한 지속시간 3시간의 기점 한계유출량 값은 3.11~60.75 cm/3hr의 범위를 보이며, 평균은 14.22 cm/3hr이다. 지속시간 6시간의 한계유출량은 6.23~121.50 cm/6hr의 범위를 보이며, 평균은 25.70 cm/6hr이다. 종점 경계홍수량을 기준으로 한 한계유출량의 결과 지속시간 1시간 단위의 기점 한계유출량은 2.57~28.75 cm/1hr이며, 평균은 8.24 cm/1hr이다. 또한 지속시간 3시간의 종점 한계유출량은 4.09~59.29 cm/3hr의 범위를 보이며,

평균은 12.877 cm/3hr이다. 지속시간 6시간의 한계유출량은 6.23~118.58 cm/6hr의 범위를 가지며, 평균은 21.99 cm/6hr이다.

- 4) 소양천 유역 및 팔송천 유역의 돌발호우 사상에 대한 한계유출량 검증 결과 1, 3, 6시간의 한계유출량과 유효우량을 비교하였을 때 유효우량이 한계유출량을 모두 상회하는 값을 가짐으로 해당 유역의 지속시간 1, 3, 6시간에 대한 한계유출량은 적절하다 판단된다.

본 연구에서 산정한 산지 소하천에 대한 한계유출량 값의 적용성을 검토한 결과 전반적으로 타당한 것으로 판단되며, 이와 같은 결과는 한강유역 돌발홍수에보시스템의 기초자료로 활용될 예정이다. 향후 보다 많은 돌발홍수에 대한 검증 사상을 선정하여 후 유량자료의 수집을 통해 경계홍수량 또는 위험유량의 비교 검토가 요구된다. 또한 기존 연구에서 제시한 하폭, 수리수심, 국지하천경사에 대한 회귀식을 본 연구에서 개선하였으나, 향후 보다 많은 자연형 하도단면 자료를 수집하여 이에 대한 정확도 향상이 요구된다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

- 김운태, 배덕효, 조천호 (2002). "돌발홍수에보를 위한 미소유역의 한계유출량 산정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제5호, pp. 553-561.
- 김진훈, 배덕효 (2006). "한강유역 한계유출량 산정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제2호, pp. 151-160.
- 김진훈 (2007). 한국형 돌발홍수 예경보모델 개발, 박사학위논문, 세종대학교.
- 배덕효, 김진훈 (2007a). "한국형 돌발홍수 예경보시스템 개발 (I) 이론 및 시스템 설계." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제3호, pp. 237-243.
- 신현석, 김홍태, 박무종 (2004). "GIS와 GCUH를 이용한 돌발홍수 기준우량 산정의 타당성 검토 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제5호, pp. 407-424.

- 최현, 남광우 (2005). "산악에서 돌발홍수예측을 위한 지리 정보시스템의 적용." **대한원격탐사학회지**, 대한원격탐사학회, 제21권, 제4호, pp. 317-327.
- 최현, 이상진 (2006). "지형학적순간단위도를 이용한 미세측 소유역의 한계유출량 산정 검증." *The Journal of GIS Association of Korea*, Vol. 14, No. 1, pp. 15-27.
- Bras, R.L. (1990). *Hydrology: An Introduction to Hydrologic Science*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Carpenter, T.M., and Georgakakos, K.P. (1993). *GIS-based Procedures in Support of Flash Flood Guidance*, IIHR Report No. 366, pp. 1-37.
- Carpenter, T.M., Sperflage, J.A., Georgakakos, K.P., Sweeney, T., and Fread, D.L. (1999). "National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems." *Journal of Hydrology*, Vol. 224, pp. 21-44.
- Rodriguez-Iturbe, I., and Valdes, J.B. (1979). "The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response." *Water Resources Research* Vol. 15, No. 6, pp. 1409-1419.
- Rodriguez-Iturbe, I., Gonzalez-Sanabria, M., and Bras, R.L. (1982). "A Geomorphoclimatic Theory of the Instantaneous Unit Hydrograph." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 877-886.
- Sweeney, T.L. (1992). *Modernized Areal Flash Flood Guidance*, NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO44.

논문번호: 11-088	접수: 2011.07.28
수정일자: 2011.09.26/10.12	심사완료: 2011.10.12