

## 돌발홍수예보를 위한 미소유역의 한계유출량 산정

### Threshold Runoff Computation for Flash Flood Forecast on Small Catchment Scale

김 운 태\* / 배 덕 효\*\* / 조 천 호\*\*\*

Kim, Woon Tae / Bae, Deg Hyo / Cho, Chun Ho

#### Abstract

The objectives of this study are to introduce flash flood forecasting system in Korea and to develop a system for computing threshold runoff on very fine catchment scale. The developed GUI system composed of 9 steps starting from input data preparation to input file creation for flash flood forecasting compute basin subdivision, hydrologic subbasin characteristics, bankfull flows, unit peak flows and threshold runoffs on about 5 km<sup>2</sup> scale. When the developed system was applied on Pyungchang IHP basin, the computed 1-hour threshold runoffs ranged 18.72~81.96mm with average value of 46.39mm. Judging from the comparison of the computed threshold runoffs between this study area and three other basins in United States, the computed results in this study were reasonable. It can be concluded that the developed system on ArcView/Avenue are useful for computing threshold runoff on small catchment and can be used as a component of flash flood forecasting system.

**keywords :** threshold runoff, flash flood, GUI system, GIS

#### 요 지

본 연구의 목적은 돌발홍수예보 시스템의 개념을 국내에 도입하고 미소유역 규모의 한계유출량을 산정할 수 있는 시스템을 개발하는데 있다. 입력자료 설정에서 돌발홍수예보 입력파일 생성 등 총 9단계로 구성된 한계유출량 산정 GUI 시스템은 약 5 km<sup>2</sup> 규모로 소유역을 구분하며, 구분된 각 미소유역별 수문특성인자, 제방월류유량, 단위도 침투유량 및 한계유출량을 산정한다. 개발된 시스템을 평창강 유역에 적용한 결과, 지속시간 1시간의 토양이 포화된 상태에서 소하천이 범람하는데 요구되는 유효강우량을 나타내는 한계유출량은 18.72~81.96 mm의 범위를 갖고, 평균값은 46.39 mm인 것으로 나타났다. 평창강 유역의 미소유역별 산정된 한계유출량을 국외의 타 연구 사례와 비교한 결과 평창강 유역에서 산정된 결과는 적절한 것으로 판단된다. 본 연구에서 구축된 ArcView/

\* 세종대학교 토목환경공학과, 석사과정  
Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea  
(E-mail : syriwoos@intizen.com)

\*\* 세종대학교 물자원연구소·토목환경공학과, 부교수  
Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea  
(E-mail : dhhbae@sejong.ac.kr)

\*\*\* 기상연구소 예보연구실, 실장  
Director, Forecast Research Lab., Meteorological Research Institute, Seoul 156-720, Korea

Avenue 기반의 한계유출량 산정 GUI 시스템은 국내 타 유역에도 적용 가능할 것으로 판단되어 향후 국내 돌발홍수예경보 시스템의 일부로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 한계유출량, 돌발홍수, GUI 시스템, GIS

## 1. 서론

최근 지구온난화, 엘니뇨 및 라니냐 등의 지구환경 변화에 따른 기후변화의 영향으로 지구상의 여러 지역에서 집중호우로 인한 많은 인명과 재산피해를 입고 있다. '93, '95, '99년의 유럽 대홍수와 '93년의 미국 미시시피강 유역 대홍수, '98년 중국의 양쯔강 유역에 대홍수가 발생하였고, 우리나라에서도 '90년에 남한강 유역의 대홍수와 '96, '98년 경기북부 지역에 대홍수가 발생하였다. 특히 '90년대 후반에는 강수의 특징이 극단화되면서 국지적인 집중호우에 의한 돌발홍수가 빈번히 발생하고 있다. 일례로 '98년의 지리산 일원에서 발생한 사망 68명, 실종 27명 및 재산피해 1,186 억원의 손실을 초래한 것이 대표적인 경우이다(국립방재연구소, 1998). 이러한 돌발홍수로 인한 피해를 경감하기 위해서는 댐 및 제방 건설 등의 구조적 대책과 홍수예경보 시스템 구축과 같은 비구조적 대책을 병행하여 추진하고 있다. 그러나, 현장에서 사용되고 있는 강우-유출 모형에 의한 홍수예보 시스템은 강우의 실관측치를 모형의 입력자료로 요구하기 때문에 홍수도달 시간이 짧은 소유역의 돌발홍수를 예보하는데는 실효성을 거두지 못하고 있다. 따라서, 이러한 홍수예보의 문제점과 최근의 사회적, 환경적 여건으로 인한 구조적 대책의 한계성 때문에 다른 비구조적 대책의 일환인 돌발홍수예경보 시스템(flash flood forecast and warning system)의 구축이 어느 때보다 중요하게 되었다.

미국의 국립기상청(National Weather Service) 현장에서 운영하고 있는 돌발홍수예경보 시스템은 크게 나누어 수문학적 부분과 기상학적인 부분으로 구성되어 있다. 수문학적인 부분은 1, 3, 6시간 등 특정 단위시간 동안 특정 유역의 소하천이 홍수를 야기하는데 요구되는 강우량인 돌발홍수능(flash flood guidance)을 계산하는 과정으로 이는 유역면적, 경사, 하도단면의 형상 및 크기 등 유역의 수문학적 특성과 현재의 토양수분 상태에 따라 달라진다. 따라서 돌발홍수능은 토양이 완전 포화상태에서 소하천의 범람을 야기하는데 요구되는 유효우량인 한계유출량(threshold runoff)을 산정하고 토양수분을 모의할 수 있는 연속유출모형(continuous

runoff model)에 한계유출량을 역입력하여 특정 소하천 유역에 홍수가 발생하는데 요구되는 강우량을 산정하여 돌발홍수능을 실시간으로 모의한다. 한편 돌발홍수예경보 시스템의 기상학적인 부분은 기상예보 수치모형, 레이더 및 인공위성 영상으로부터 향후 1, 3, 6시간 등 특정 단위시간 동안의 강우량을 사전에 예측하는 부분이다. 돌발홍수예보는 향후 특정 단위시간 동안 예측된 강우량과 특정 지역의 돌발홍수능을 상대 비교하여 예측된 강우량이 돌발홍수능보다 큰 경우 돌발홍수 주의보 및 경보를 발령하고 예측된 강우량이 더 작은 경우에는 돌발홍수 해제를 발령한다. 이와 같이 특정 유역의 돌발홍수예경보의 정확도는 향후 특정 시간 이내에 예상되는 강우량을 정확히 예보하는 부분과 수문학적 돌발홍수능을 얼마나 정확히 산정할 수 있는가에 달려 있다. 이와 같은 관점에서 특정 지역의 수문학적 한계유출량을 정확히 산정하는 것은 매우 중요한 일이다.

이와 같은 돌발홍수의 개념은 미국의 국립기상청에서 '70년대 중반에 처음 도입되었으며, '90년대 초반 컴퓨터의 발달과 지형정보시스템(GIS)이 보편화되면서 보다 소유역 단위로 산정이 가능하게 되었다. Sweeney (1992)는 돌발홍수능의 표준적인 산정 알고리즘을 제시하였으며, Carpenter와 Georgakakos(1993)는 GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) 기반의 미소유역의 한계유출량을 산정할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 또한, Carpenter 등(1999)은 돌발홍수능을 산정하는데 있어 중요한 역할을 하는 한계유출량 산정의 4가지 방법에 대한 특성을 분석 제시하였다. 국내에서는 배덕효 등(2001)이 평창강 유역의 각 수위지점별 한계유출량을 산정하여 제시한 바 있으나 국지적인 집중호우에 의한 돌발홍수를 예보하기 위해서는 더욱 세분화된 미소유역에서 한계유출량을 산정할 수 있는 알고리즘의 개발 필요성을 언급하였다.

따라서 본 연구에서는 수치표고모델(DEM) 자료와 지형정보시스템을 이용하여 국내 소하천 유역의 세방월류유량 및 한계유출량을 객관적으로 산정할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 또한 ArcView/Avenue를 활용하여 GUI 시스템을 구축함으로써 비전문가에게 한계유출량 산정의 편의성을 제공하고자 한다.

## 2. 한계유출량 산정 모형

한계유출량은 토양이 완전 포화된 상태에서 소하천의 제방을 월류하기 시작하여 홍수를 일으키기 시작할 때의 유효유량으로 정의되며, 이는 유역과 하천의 특성에 따라 좌우된다. 따라서 한계유출량은 식 (1)에서와 같이 단위도의 침투유량  $q_{pR}$ (cfs/mi<sup>2</sup>/in)에 유역면적  $A$ (mi<sup>2</sup>)와 유효유량  $R$ (in)을 곱한 값이 유역 출구에서의 제방월류유량  $Q_p$ (cfs)와 동일하다는데 근거하여 산정될 수 있다. 즉 단위도의 기본개념이 특정 단위시간 동안 균일한 강도로 유역전반에 걸쳐 균등하게 내리는 단위 유효유량으로 인해 발생하는 직접유출 수문곡선이므로 유효유량  $R$ 은 식 (1)에서 한계유출량에 해당하며, 이는 다음 식 (2)와 같이 표현된다.

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

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

여기서, 제방월류유량  $Q_p$ 를 결정하는 방법에는 하도면의 특성을 이용한 Manning 공식으로부터 산정하는 방법과 2년 빈도의 홍수량을 제방월류유량으로 가정하여 산정하는 방법이 있다. 단위도의 침투유량  $q_{pR}$ 은 실측 강우 및 유량자료가 존재하는 경우 단위도를 유도하여 결정할 수 있으나 대부분의 소하천 유역은 비계측 지역이므로 Snyder 방법과 같은 합성단위도를 이용하는 방법과 유역의 지형특성이나 Horton의 하천계수 등을 사용하는 지형학적 순간단위도(Rodriguez와 Valdes, 1979)를 이용하는 방법이 있다. 따라서 한계유출량을 산

정하는 방법으로는 다음의 4가지로 요약될 수 있다 (Carpenter와 Georgakakos, 1993).

- (1) Manning의 홍수유량 & GIUH
- (2) Manning의 홍수유량 & Snyder 합성단위도법
- (3) 2년빈도 홍수량 & GIUH
- (4) 2년빈도 홍수량 & Snyder 합성단위도법

그림 1은 한계유출량을 산정하는 제반 기법에 대해 요구되는 자료를 나타낸 것이다. 이들 가운데 본 연구에서 사용된 기법을 살펴보면 다음과 같다.

### 2.1 Manning의 홍수유량

소유역에 균일한 강도의 강우가 지속되어 하천 제방에서 월류가 시작될 때의 유량을 제방월류 유량이라고 한다. Henderson(1966)에 의하면 수리적으로 완전히 거친 흐름의 저항식과 Manning 공식은 기본적으로 같은 형태이므로 Manning 공식은 수리적으로 거친 흐름의 마찰저항식이라는 것을 알 수 있다. 따라서 제방월류 유량은 Manning 공식으로부터 산정이 가능하며, 이는 수심( $Y_b$ ), 하폭( $B_b$ ), 하도경사( $S_c$ ) 및 형상계수( $m$ )로부터 식 (3)과 같이 표현된다.

$$Q_p = Q_{bf} = \frac{1.486 S_c^{0.5} B_b}{n} \left[ \frac{Y_b}{m+1} \right]^{5/3} \quad (3)$$

여기서,  $n$ 은 Manning의 조도계수이며,  $n \geq 0.035$  일 때 조도계수는 식 (4)와 같이 하도경사, 수심 및 형상계수의 함수로 표현된다(Jarrett, 1984).

$$n = \frac{0.39 S_c^{0.38}}{\left[ \frac{Y_b}{m+1} \right]^{0.16}} \quad (4)$$

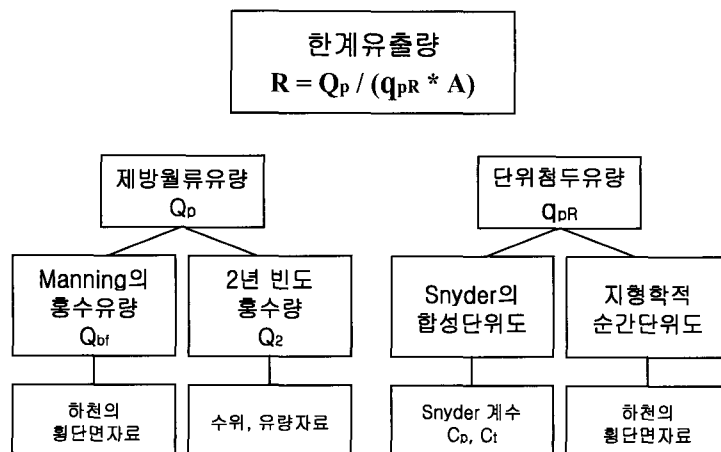


그림 1. 한계유출량 산정 기본자료

식 (3)에서 알 수 있는 것처럼 Manning 공식에 의해 제방월류유량을 산정하기 위해서는 수심, 하폭과 같은 하도특성 자료가 요구된다. 그러나 본 연구에서와 같이 미소면적( $0 \sim 12 \text{ km}^2$ )별로 Manning의 홍수유량을 산정하고자 할 경우 각 소유역별 하천 횡단면 자료는 존재하지 않는 경우가 대부분이다. 이 경우 가용한 하천횡단면 자료로부터 Manning의 홍수유량을 산정한 후, 유역면적과 Manning의 홍수유량 사이에 식 (5)와 같은 관련 식을 도출하여 적용할 수 있다.

$$Q_{bf} = a A^b \quad (5)$$

## 2.2 Snyder 합성단위도법

Snyder는 지속시간  $t_r$ 과 지체시간  $t_p$ 와의 관계가  $t_r = t_p/5.5$ 가 될 때의 단위유량도를 유도하기 위해서 다음과 같은 경험공식을 제안하였다.

$$t_p = C_t [L \cdot L_c]^{0.3} \quad (6)$$

여기서, 지체시간  $t_p$ 는 지속시간  $t_r$ 인 유효우량 주상도의 중심과 첨두유량 발생시간의 차이를 나타낸다.  $L$ 은 유역출구에서부터 본류를 따라 유역경계선까지 측정된 거리(mi),  $L_c$ 는 유역의 중심에 가장 가까운 본류상의 점에서 유역출구까지의 거리(mi)이며,  $C_t$ 는 유역특성에 관계되는 계수로 일반적으로  $0.3 \sim 1.2$ 의 범위이다. 또한, 지속시간  $t_r$ 동안 1 inch의 강우가 단위배수유역에

내릴 때의 단위유량도의 첨두유량  $q_p(\text{cfs}/\text{mi}^2)$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$q_p = \frac{640 C_p}{t_p} \quad (7)$$

여기서,  $C_p$ 는 유역특성에 의해 결정되는 계수로 일반적으로  $0.4 \sim 0.8$ 의 범위를 가진다. 만약 실제 강우의 지속시간이  $t_r$ 과 상이한  $t_R$ 인 경우에는  $t_R$ 에 해당하는 단위면적당 첨두유량  $q_{pR}(\text{cfs}/\text{mi}^2)$ 은 식 (8)과 같이 표현되고, 식 (9)는 지속시간  $t_R$ 인 강우에 대한 유역의 지체시간  $t_{pR}$ 을 표현한 것이다. 따라서 식 (6)과 식(9)를 식 (8)에 대입하여 단위도의 첨두유량을 나타내면 식 (10)과 같다.

$$q_{pR} = \frac{640 C_p}{t_{pR}} \quad (8)$$

$$t_{pR} = t_p - \left[ \frac{t_r - t_R}{4} \right] = 0.955 t_p + 0.25 t_R \quad (9)$$

$$q_{pR} = \frac{640 C_p}{0.955 C_t [L \cdot L_c]^{0.3} + 0.25 t_R} \quad (10)$$

## 3. 미소유역의 한계유출량 산정 GUI 시스템

본 연구에서는 객관적인 미소유역의 한계유출량을 산정하기 위해 ArcView/Avenue를 이용하여 GUI (Geographic User Interface) 시스템을 구축하였다.

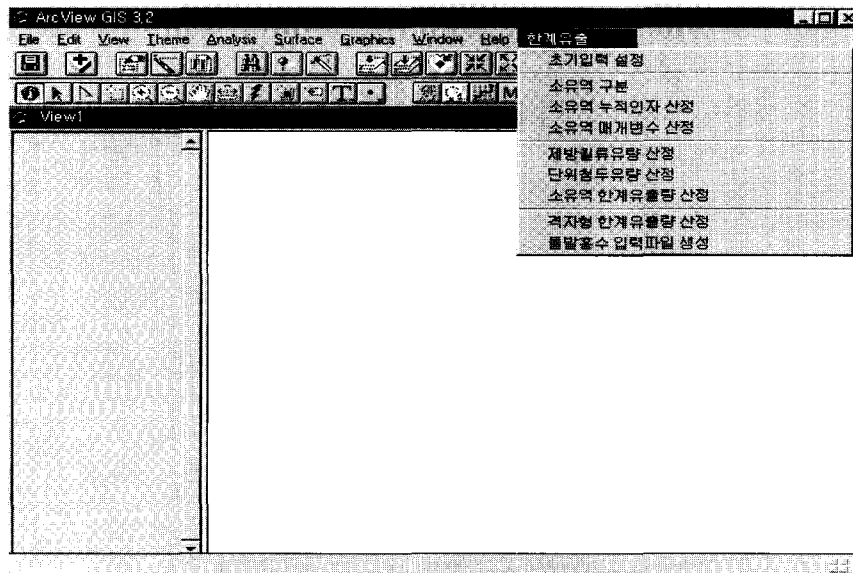


그림 2. 한계유출량 산정 GUI 시스템

Group 1	Step 1	초기입력 설정	대상유역 DEM, 흐름길이 격자, shape 등
Group 2	Step 2	소유역 구분	소유역 최대, 최소면적 입력
	Step 3	소유역 누적인자 산정	소유역 연결코드 생성
	Step 4	소유역 매개변수 산정	단위면적, 누적면적, 유로연장 계산 등
Group 3	Step 5	제방월류유량 산정	Manning의 홍수유량
	Step 6	단위침두유량 산정	Snyder의 합성단위도법
	Step 7	소유역 한계유출량 산정	소유역의 한계유출량 산정
Group 4	Step 8	격자형 한계유출량 산정	강우분석 격자포인트에 내삽
	Step 9	돌발홍수 입력파일 생성	ASCII 파일 생성

그림 3. 미소유역의 한계유출량 산정 절차

미국 ESRI 사에서 개발한 GIS 소프트웨어인 Arc-View는 미소유역의 한계유출량 산정을 위해 요구되는 방대한 공간자료인 지표형상의 특성을 분석하고 자료관리 기능이 효율적이며, Avenue는 ArcView의 매크로 언어로써 그림 2에서와 같이 사용자가 필요한 기능을 수행할 수 있도록 변경하고 새로운 기능을 생성하기가 용이한 장점을 갖고 있다.

한계유출량 산정 GUI 시스템은 그림 3과 같이 총 9 단계로 구성하였으며, 각 단계의 특성을 고려할 때 4개의 그룹으로 대별할 수 있다. 첫 번째 그룹은 DEM, 분석대상 지역, 단위유역도 등의 입력데이터를 구축하는 부분이며, 두 번째 그룹은 미소유역을 구분하고 각 미소유역의 단위면적, 유로연장, 유역경사 등 유역 특성인자를 산정하는 GIS 작업과정을 나타낸다. 세 번째 그룹은 산정된 유역 특성인자를 이용하여 제방월류유량, 단위침두유량 및 한계유출량을 산정하는 부분이며, 네 번째 그룹에서는 각 미소유역별 한계유출량을 격자형 한계유출량으로 보정하여 돌발홍수능 평가 모형의 입력자료로 사용하기 위한 아스키(ASCII) 파일을 생성하는 부분이다.

#### 4. 사례연구

##### 4.1 대상유역 현황

본 연구의 적용대상 지역은 국제수문개발계획(IIIP)의 시범유역인 평창강 유역을 선정하였다. 평창강은 유역의 최고봉인 계방산(EL. 1577.4m)에서 발원하여 남한강으로 유입되는 남한강 상류에 위치한 한강의 제 1지류이며 북으로는 홍천강, 동으로는 오대천, 서로는 남

한강 수계의 섬강과 인접한 산지성 고지대의 유역을 형성하고 있다. 유역 최하류에 위치한 방림 수위관측소 상류의 유역면적은 527.83km<sup>2</sup>, 본류연장은 51.85km, 본류와 지류를 합한 총 연장은 약 712.77 km로서 대표적인 중규모 유역에 속한다. 그림 4와 같이 유역내에는 방림을 포함한 이목정, 장평, 백옥포, 상안미, 하반정 등 총 6개의 수위관측소와 방림, 가평, 계촌, 대화, 신리, 유천, 등매, 용전, 계방, 홍정 등 11개의 우량관측소가 위치하고 있다(건기연, 1991).

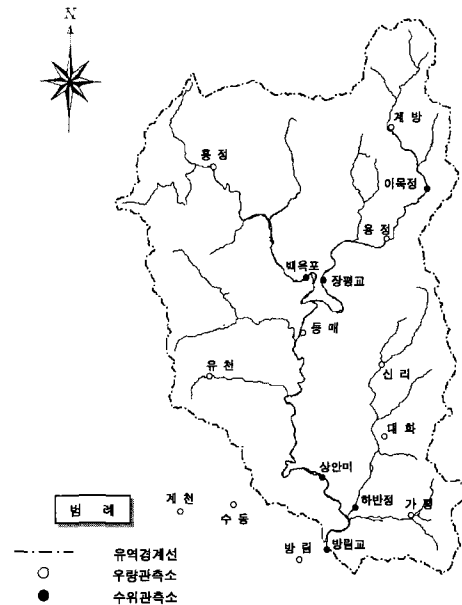


그림 4. 평창강 유역도

## 4.2 한계유출량 산정

한계유출량을 산정하기 위해서는 대상지역의 미소유역 구분 및 유역특성인자의 산출, 단위도의 침투유량 산정, 제방월류유량 산정 등이 요구된다.

### 4.2.1 유역특성인자 산출

유역특성인자는 제방월류유량과 합성단위도의 침투유량 값 산정에 영향을 미쳐 한계유출량의 값을 변화시키므로 정확한 유역특성인자의 산출은 객관적인 한계유출량 산정에 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 본 연구에서는 평창강 유역의 3" DEM 자료와 ArcView/Avenue 프로그램을 활용하여 미소유역 구분 및 흐름방향 격자, 흐름누적 격자 및 흐름길이 격자 등을 생성할 수 있도록 GUI 시스템을 구축하였다. 한계유출량 산정을 위한 미소유역의 크기는 사용자가 지정하도록 하였으며, 본 연구에서는 미소유역의 기준 크기를 2 km<sup>2</sup>으로 지정하였다. 그 결과 미소유역의 크기는 최대 12 km<sup>2</sup>, 평균 3.72 km<sup>2</sup>의 141개 미소유역으로 구분되었다. 소유역 누적인자 산정 단계에서는 하류지역의 한계유출량을 산정하기 위하여 141개의 미소유역을 코드화시켜 하천의 흐름을 따라 미소유역을 연결시키며, 소유역 매개변수 산정 단계에서 미소유역의 유역특성인자와 미소유역을 누적시켜 생성된 소유역의 특성인자를 산출한다. 표 1은 산정된 각 미소유역의 특성인자 가운

데 평창강 유역의 수위지점이 위치하고 있는 유역에서의 특성인자를 나타낸 것이다. 본 연구의 GUI 시스템에서 산정된 유역특성인자와 기존 보고서(전기연, 1991)의 유역특성인자를 비교한 결과, 유역면적의 상대오차는 2.58%, 유로연장의 상대오차는 7.45%로 나타나 비교적 신뢰성있는 결과로 판단된다.

### 4.2.2 소유역별 한계유출량 산정

미소유역의 제방월류유량은 기존의 하천횡단면 자료와 유역특성인자 사이에서 관련 식을 도출하여 산정할 수 있다(Carpenter와 Georgakakos, 1993). 본 연구에서는 유역면적, 유로연장, 유역중심연장 및 하도경사 등 여러 유역특성인자의 관련 식을 검토한 결과, 유역면적만을 이용한 관련 식에 나머지 유역특성인자를 추가한 경우에도 회귀식의 정확도가 현저히 향상되지 않아 평창강 유역의 제방월류유량은 식 (11)과 같이 유역면적의 함수로 나타내어 사용하였다.

$$Q_{bf} = 9.6717 A^{0.6127} \quad (11)$$

한편, 단위도의 침투유량을 Snyder의 합성단위도법에 의해 산정하고자 할 경우 유역의 특성을 반영하는 매개변수  $C_p$ ,  $C_t$ 를 필요로 한다. 본 연구에서는 과학기술부(2001)에서 평창강 유역의 수위관측 지점인 이목정, 장평, 백옥포, 상안미, 하반정 및 방림 지점의 관측강우량 및 유량으로부터 강우의 지속기간 1, 3, 6시간

표 1. 평창강의 각 수위지점에서 유역특성인자

특성인자 \ 수위지점	이목정	장 평	백옥포	상안미	하반정	방 립
유역면적 A(km <sup>2</sup> )	59.70	106.40	147.04	397.17	86.51	524.73
유로연장 L(km)	18.42	26.63	26.93	48.15	18.71	52.60
유역중심연장 L <sub>c</sub> (km)	9.06	16.57	13.73	23.04	8.60	22.68
하도경사 S <sub>c</sub> (radian)	0.05	0.04	0.02	0.02	0.04	0.02
최대하폭 B(m)	30.80	54.50	56.60	124.50	34.20	124.00
평균수심 Y(m)	3.15	2.68	3.03	2.965	4.26	3.45

표 2. 제방월류유량과 단위도의 침투유량

소유역		이목정	장 평	백옥포	상안미	하반정	방 립
제방월류유량 Q <sub>bf</sub> (cms)		114.283	163.228	179.858	385.795	175.349	457.453
단위침투유량 q <sub>pr</sub> (cms/km <sup>2</sup> /cm)	1hr	0.347	0.406	0.333	0.448	0.447	0.465
	3hr	0.244	0.282	0.219	0.290	0.217	0.300
	6hr	0.169	0.201	0.167	0.199	0.194	0.211

별로 유도된 단위도를 이용하여 산정한 매개변수  $C_b$ ,  $C_t$  값을 이용하였으며, 각 수위지점의 상류지역인 미소유역에 대해서는  $C_b$ ,  $C_t$  값이 각 수위지점과 동일하다는 가정하에 미소유역의 단위도 첨두유량을 산정하였다. 표 2는 각 수위지점에서의 제방월류유량과 단위도의 첨두유량을 산정하여 나타낸 것이다. 제방월류유량은 유역의 하류로 진행되면서 증가됨을 알 수 있으며, 강우의 지속시간이 증가될수록 단위도의 첨두유량은 감소하는 것으로 나타났다.

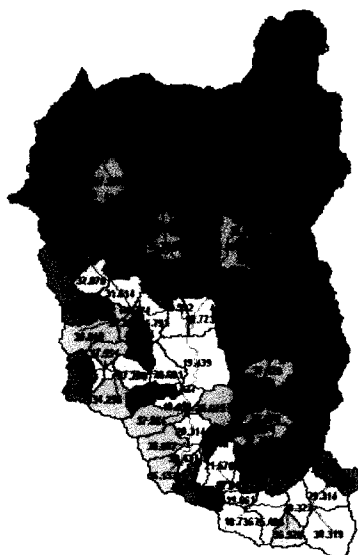
그림 5는 미소유역의 토양수분이 완전 포화상태일 때의 한계유출량을 산정한 결과중 일부를 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 강우의 지속시간이 1시간일 때 평창강의 미소유역의 한계유출량을 도시한 것이며, 그림 5(b)는 1km×1km 크기의 강우분석 격자포인트에 그림 5(a)의 결과를 내삽하여 격자형 한계유출량을 산정한 것이다. 색의 농도는 한계유출량의 크기를 정량적으로 표현한 것이며, 짙은 색은 대부분 상류수원을 나타내면서

서 한계유출량의 값이 크고 옅은 색은 하류의 합류지점과 하도폭이 넓어지는 하류 부분을 나타내면서 한계유출량의 값이 대체적으로 작은 것으로 나타났다. 평창강 유역에서 한계유출량의 최대값은 81.96mm, 최소값은 18.72 mm이고 평균값은 46.39 mm로 산정되었다.

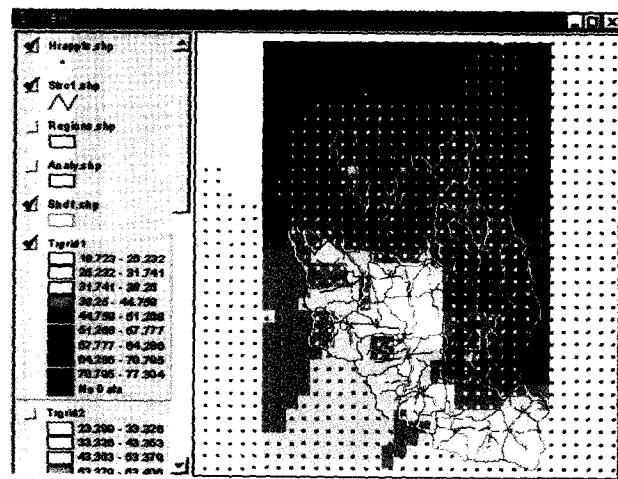
표 3은 평창강 유역의 주요 수위 지점별 한계유출량을 나타낸 것이다. 토양이 완전 포화상태에서 유역출구인 방림 지점에서는 1시간당 18.74 mm, 상류지역 이목정 지점에서는 1시간당 58.32 mm가 내릴 경우 홍수가 발생함을 의미한다. 그림 6은 유역 누적면적과 각 지속시간별 한계유출량의 관계를 도시한 것으로 두 값 사이에는 반비례 관계를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 상류지점에서 하류지점으로 이동할수록 유역면적이 누적되어 증가하면서 한계유출량은 줄어들고 강우의 지속시간이 길어질수록 한계유출량의 증가폭이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 토양수분이 완전 포화상태에서의 한계유출량은 돌발홍수능과 같으므로 하류유역에

표 3. 각 수위지점별 한계유출량

한계유출량		소유역	이목정	장 평	백옥포	상안미	하반정	방 립
Threshold Runoff (mm)	1hr		58.32	39.80	42.89	21.67	39.15	18.74
	3hr		70.73	48.79	51.96	26.75	47.82	23.30
	6hr		89.35	62.28	65.56	34.38	60.81	30.14



(a) 소유역별 한계유출량



(b) 격자형 한계유출량

그림 5. 한계유출량 (지속시간 1시간)

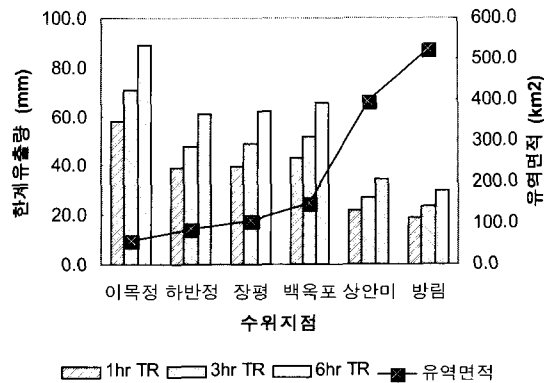


그림 6. 한계유출량과 유역면적의 관계

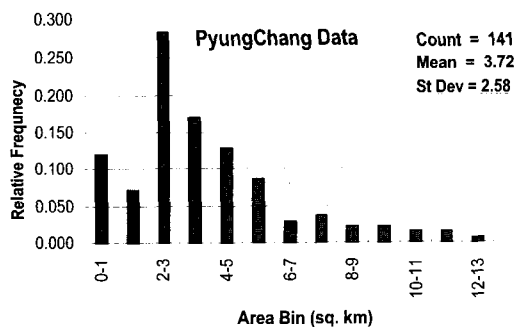
서는 상류유역보다 상대적으로 더 작은 강우로도 홍수 발생 가능성이 크다는 것을 알 수 있다.

#### 4.3 한계유출량 비교·분석

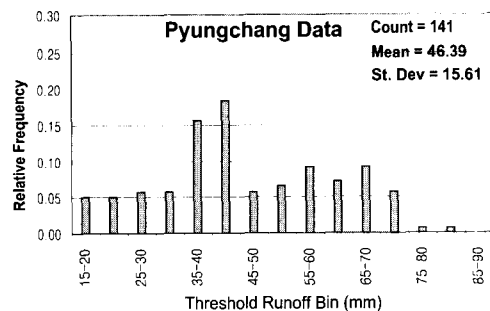
토양이 완전포화 상태에서 최대 지표면 유출량을 나타내는 한계유출량은 개념적인 유출량이므로 실측자료가 존재하지 않으며, 국내에서는 이전에 산정된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 본 연구에서 산정된 한계유출량이 적정한지를 검토하기 위하여 기존 국외에서 산정된 결과와 상대적인 비교를 실시하였다.

돌발홍수예경보 시스템이 현업에 운영되고 있는 미국의 경우 동일지역에 대해 2장에서 언급한 4가지 방법으로 한계유출량을 산정하여 비교한 결과, 재방류유량이 한계유출량 변화에 가장 큰 영향을 미치고 상대적으로 단위도의 침투유량은 영향이 적은 것으로 나타났다 (Carpenter 등, 1999). 그림 7은 Carpenter 등(1999)이 미국 캘리포니아, 아이오와 및 오클라호마 지역을 대

상으로 산정한 미소유역의 면적 분포 및 한계유출량과 상대적인 비교를 위해서 평창강 유역에 대한 유역면적과 한계유출량의 분포 및 이에 대한 통계치를 산정하여 제시한 것이다. 미국 캘리포니아, 아이오와 및 오클라호마 유역에서 구분된 미소유역의 평균면적은 각각 9.66, 10.41, 9.77km<sup>2</sup> 이며 표준편차는 각각 8.33, 8.89, 7.81km<sup>2</sup> 인데 비해 평창강유역의 미소유역 평균 및 표준편차는 3.72, 2.58 km<sup>2</sup> 로 평창강 유역이 상대적으로 더욱 세분화되었음을 알 수 있다. 또한 캘리포니아, 아이오와, 오클라호마 및 평창강 유역의 구분된 미소유역에 대한 변동계수는 각각 0.86, 0.85, 0.80 및 0.70으로 나타나 평창강 유역의 미소유역에 대한 변동폭이 미국의 3 유역보다는 적으며, 상대적으로 오클라호마 유역과 비슷한 것으로 나타났다. 한편 이들 4유역에 대해 강우지속기간이 1시간일 때 산정된 한계유출량의 빈도분포곡선의 범위, 평균 및 표준편차는 캘리포니아 유역의 경우 4~20, 9.45, 1.47mm, 아이오와 유역의 경우 4~24,



(a) 유역면적 분포



(b) 한계유출량 분포

그림 7. 평창강 유역의 유역면적과 한계유출량 분포도



14.20, 2.94mm, 오클라호마 유역의 경우 16~76, 38.70, 8.88mm, 평창강 유역의 경우 15~85, 46.39, 15.61mm로 나타났다. 이들 4유역의 한계유출량을 비교한 결과, 평창강유역의 한계유출량은 미국에서 산정된 1시간 한계유출량의 범위와 유사하게 산정되었으며, 상대적으로 오클라호마 유역과 비슷한 값으로 산정되었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 돌발홍수예경보 시스템의 기본 개념을 국내에 도입하고, 돌발홍수예 산정의 기본이 되는 한계유출량을 미소유역별로 객관적으로 산정할 수 있도록 한계유출량 산정 GUI 시스템을 구축하고 그 적용성을 평창강 IHP 유역을 대상으로 검토하였다. 구축된 시스템은 ArcView/Avenue 환경하에 입력자료 설정, 소유역 구분, 소유역 누적인자의 산정, 소유역 매개변수 산정, 제방월류유량 산정, 단위침투유량 산정, 소유역 한계유출량 산정, 격자형 한계유출량 산정 및 돌발홍수 입력파일 생성 등 총 9단계로 구성하였으며, 요구되는 입력자료로는 정확한 DEM 자료와 하도단면 자료가 요구된다. 본 연구에서 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

본 연구의 GUI 시스템에서 산정된 유역면적 및 유로연장 등 유역특성인자를 기존의 보고서와 비교한 결과, 상대오차가 각각 2.58, 7.45%로 나타나 비교적 신뢰성 있는 결과로 판단된다. 또한 평창강 유역내 미소유역별 제방월류유량을 산정한 결과 유역의 상류유역(headwater basin)인 이목정, 백옥포, 하반정은 각각 114.283, 179.858, 175.349  $m^3/sec$ 이며, 유역출구인 방림에서는 457.453  $m^3/sec$ 으로 나타났다. 평창강 유역의 미소유역별 지속시간 1시간의 한계유출량을 산정한 결과 한계유출량은 18.72~81.96mm의 범위를 갖고, 평균값은 46.39mm인 것으로 나타났다. 한편, 평창강 유역의 미소유역별 산정된 한계유출량을 국외의 타 연구사례와 비교한 결과 평창강 유역에서 산정된 한계유출량은 적절한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 구축된 ArcView/Avenue 기반의 한계유출량 산정 GUI 시스템은 국내 타 유역에도 약 5  $km^2$  이내의 미소유역 크기로 한계유출량을 산정할 수 있을 것으로 판단되어 국내 돌발홍수예경보 시스템의 일부로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 기상청에서 시행하는 기상지진기술개발사

업의 세부과제 악기상 감시, 예측 및 재해대응 기술개발로 수행된 것이며 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 국립방재연구소 (1998). **지리산 일원 호우피해 조사 및 분석**, 현장조사보고서, NIDP-98-01
- 과학기술부 (2001). **악기상 감시·예측 및 재해대응 기술 개발**, 기상연구소 MR001C13 N2-02-02-A-01, pp.123-125.
- 배덕효, 최지혜, 장기호 (2001). "평창강 유역의 한계유출량 산정." **한국수자원학회 학술발표회 논문집 (I)**, 한국수자원학회, pp. 286-291.
- 한국건설기술연구원 (1991). **평창강 유역의 수문특성조사**, 건기연 91-WR-111, pp. 4-142.
- Carpenter, T.M., and Georgakakos, K.P. (1993). *GIS-based Procedures in Support of Flash Flood Guidance*. IIHR Report No. 366, Iowa Institute of Hydraulic Research The University of Iowa, Iowa City, pp. 1-27.
- 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
- Henderson, F.M. (1996). *Open-Channel Flow*, MacMillan Pub. Co., Inc., New York, pp. 90-101.
- Jarrett, R.D. (1984). "Hydraulics of High-Gradient Streams." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 11, pp. 1519-1539.
- Rodriguez-Iturbe, I., Valdes, J. B. (1979). "The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response." *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1409-1419.
- Sweeney, T.L. (1992). *Modernized Areal Flash Flood Guidance*, NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO44.

(논문번호:02-53;접수:2002.8.03/심사완료:2002.09.16)