

# 한강유역의 한계유출량 산정

## Estimation of Threshold Runoff on Han River

배덕효\*, 김진훈\*\*, 장기호\*\*\*  
Deg-Hyo Bae, Jin-Hoon Kim, Ki-Ho Chang

### 요 지

본 연구는 돌발홍수 예경보시스템의 수문학적 주요 구성요소인 한계유출량을 한강유역에 대해 산정하는 것이 주목적이다. 이를 위해 Landsat TM 영상자료로 추출된 DEM 자료로부터 미소 소유역(0.01~56.7km<sup>2</sup>) 및 하천도를 추출하고, 자연하도 및 소유역 매개변수의 지역적 회귀분석을 통해 Manning의 제방월류 유량(Q<sub>bf</sub>) 및 GIUH의 단위도 침투유량(Q<sub>pr</sub>)을 계산하였다. 이러한 결과를 활용하여 한강유역 headwater 유역에 대한 1시간 단위의 한계유출량을 계산한 결과, 그 값이 0.01~1.29 inch(0.25~32.77mm)의 범위를 보였으며, 상류쪽 유역이고 유역면적이 작은 소유역일수록 한계유출량이 작게 산정되었다.

핵심용어 : 한계유출량, 지역 회귀분석, 제방월류 유량, 단위도 침투유량

### 1. 서 론

최근 지구환경 변화에 따른 기후변화의 영향으로 짧은 시간에 매우 높은 강우강도를 가지는 집중호우로 인한 돌발홍수의 피해가 빈번히 발생하여 많은 인명과 재산피해를 초래하고 있다. 이러한 돌발홍수를 사전에 예측하기 위한 기존의 홍수예측 시스템은 강우 실관치를 모형의 입력자료로 홍수유출을 계산하는데, 돌발홍수가 발생할 수 있는 악기상 조건에서는 강우가 관측될 때 이를 이용하여 유출계산을 수행하고 그 결과 위험하다고 판단될 때 홍수예경보를 하기 위해서는 시간이 매우 촉박하기 때문에 어느 정도 한계성을 지니고 있다. 이와 같은 상황에서 특정 유역의 토양수분 상태, 한계유출량(threshold runoff), 단기 기상예보 자료 등으로부터 돌발홍수능(Flash Flood Guidance, FFG)을 계산할 수 있는 실시간 돌발홍수 예경보시스템을 개발하여 홍수예경보 시스템에 적용한다면 악기상 감시예측기술의 향상과 더불어 재해의 방지차원에서 매우 유용한 대책이 될 것이다. 본 연구에서는 이러한 돌발홍수 예경보시스템 개발을 위한 수문학적 사전정보로 매우 중요한 역할을 수행하는 한계유출량을 한강유역 전역에 대해 산정하고 이들의 수문학적 거동특성을 분석하고자 한다.

### 2. 한계유출량 개념 및 산정방법

한계유출량은 토양수분의 포화된 상태에서 소하천 제방을 월류하기 시작하여 홍수를 일으키기 시작할 때의 유효우량으로 정의되며, 이는 유역과 하천의 특성에 따라 좌우된다. 단위도의 기본개념이 특정 단위시간 동안 균일한 강도로 유역전반에 걸쳐 균등하게 내리는 단위 유효우량으로 인해 발생하는 직접유출 수문곡선이므로 한계유출량은 식 (1)에서와 같이 단위도의 침투유량  $q_{pr}(cfs/mi^2/in)$ 에 유역면적  $A(mi^2)$ 와 유효우량  $R(in)$ 을 곱한 값이 유역 출구에서의 제방월류유량  $Q_b$ 와 동일하다는 개념에 근거하여 산정될 수 있다. 즉 식 (1)에서 유효우량에 해당하는  $R$ 값이 한계유출량이며 이는 다음 식 (2)와 같이 표현된다.

\* 정회원 · 세종대학교 수문연구소 · 토목환경공학과 부교수 · E-mail : [dhbae@sejong.ac.kr](mailto:dhbae@sejong.ac.kr)

\*\* 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 박사과정 · E-mail : [jhcnu@chol.com](mailto:jhcnu@chol.com)

\*\*\* 정회원 · 기상청 · 기상연구소 · 예보연구실 · 연구사 · E-mail : [khchang@metri.re.kr](mailto:khchang@metri.re.kr)

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

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

여기서 제방월류 유량  $Q_p$ 를 결정하는 방법에는 특정 유역의 하도단면 특성을 이용한 Manning 공식으로부터 산정하는 방법과 2년빈도의 홍수량을 제방월류 유량으로 가정하여 산정하는 방법이 있다. 단위도의 침투유량  $q_{pR}$ 은 실측 강우 및 유량자료가 존재하는 경우 단위도를 유도하여 결정할 수 있으나 소하천 유역은 미계측 지역이 대부분이므로 Snyder방법과 같은 합성단위도를 이용하는 방법과 유역의 지형특성이나 Horton의 하천 계수 등을 사용하는 지형학적 순간단위도(Geomorphology Instantaneous Unit Hydrograph, GIUH)를 이용하는 방법이 있다. 그림 1은 한계유출량 산정의 제반 기법에 요구되는 필수 자료를 나타낸 것이다. 제방월류 유량  $Q_p$ 를 Manning 공식을 이용하여 산정할 경우 단면적, 윤편 등의 하도단면 자료가 요구되며, 2년빈도의 홍수량에 의해  $Q_p$ 를 산정할 경우 빈도해석을 위한 과거의 유량자료가 필요하다. 단위도의 침투유량  $q_{pR}$ 을 산정하기 위해 Snyder 합성단위도법을 이용할 경우 Snyder 계수( $C_p, C_t$ )가 결정되어야 하며, 지형학적 순간단위도법을 이용하기 위해서는 유역의 하도단면과 유역특성 값이 산정되어야 한다(Carpenter와 Georgakakos, 1993).

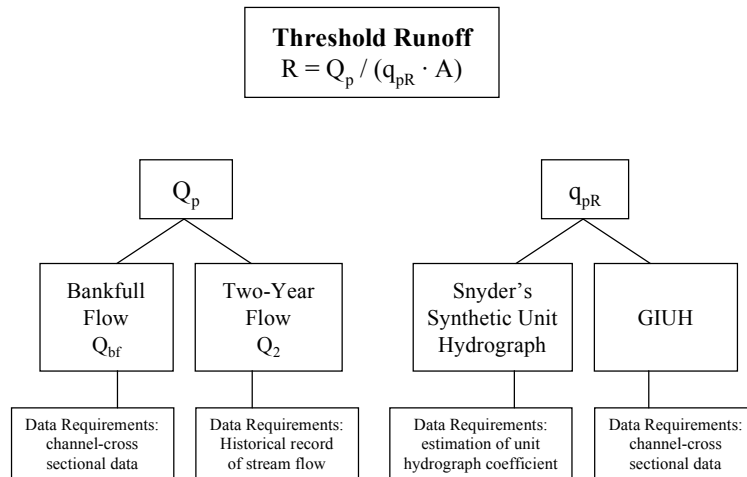


그림 1. 한계유출량 산정방법에 따른 수리·수문자료

한계유출량의  $Q_p$  산정에서 재현기간 2년 빈도의 홍수량  $Q_2$ 는 그 산정을 위해 과거 수문자료가 필요한데, 한계유출량 산정에서는 미소 소유역(5~20km<sup>2</sup>)을 기반으로 하기 때문에 미계측 유역에서의 수문자료의 보유 가능성이 매우 희박하다. 따라서 본 연구에서는 소유역의 하도단면 자료와 GIS 기반의 유역 특성인자로부터  $Q_p$ 를 산정할 수 있는 Manning의 제방월류 유량인  $Q_{bf}$ 를 사용하였다. 또한, 단위도 침투유량  $q_{pR}$  산정은 Snyder 합성단위도 기법이 가지고 있는 고유 매개변수( $C_p, C_t$ ) 산정의 한계성으로 인해 특정유역의 지형학적 관계로부터  $q_{pR}$ 을 산정할 수 있는 GIUH(Rodriguez와 Valdes, 1979) 기법을 활용하였다.

### 3. 한계유출량 산정

#### 3.1 GIS 기반의 소유역 지형자료 추출

돌발홍수 예경보시스템 개발을 위해서는 현상태의 토양수분, 한계유출량 등의 수문학적 구성요소와 1~100km<sup>2</sup>의 해상도를 가지는 기상 수치모델 및 레이다 강우 예보자료로부터 FFG를 계산(Carpenter와 Georgakakos, 1993)해야 하므로 한강과 같은 대유역을 5~20km<sup>2</sup> 정도의 소유역으로 분할하여 한계유출량을

산정해야 FFG 계산시 강우 예보자료와의 대응관계를 유지할 수 있을 것이다. 또한 수문학적 개념에서도 유역의 균질성을 유지하기 위해서는 미세 소유역 기반으로 한계유출량 정보를 제공해야 보다 정확한 유역특성을 반영할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 개념에서 한계유출량을 산정하기 위해 Landsat TM 위성자료(30m)로 추출된 그림 2와 같은 수치지형자료(DEM)를 바탕으로 유닉스 기반의 GRASS v6.0을 활용하여 미세 소유역 및 이에 따른 하천도를 추출하였다(그림 3). 그림 3과 같이 한강유역 전체(동해권 및 안성정 유역 포함)를 8,251개의 소유역으로 분할하였으며, 그들의 면적은 0.01~56.7km<sup>2</sup>의 범위를 가진다.

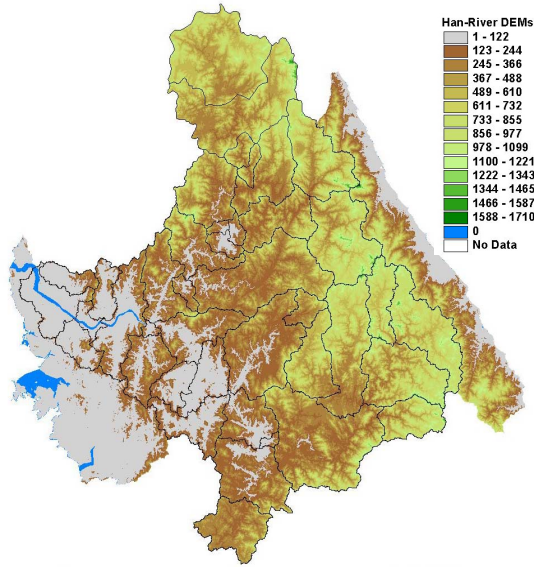


그림 2. 한강유역 수치고도모델(DEM)

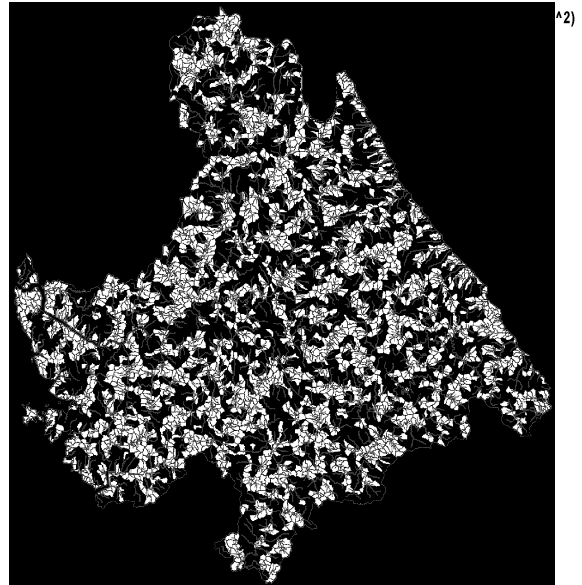


그림 3. 한강유역 한계유출량 소유역구분

### 3.2 Q<sub>bf</sub> 산정을 위한 지역적 회귀분석

자연상태에서 제방이 가득 찬 상태의 유량, 즉 제방이 월류하기 시작할 때의 유량은 식 (3)과 같은 등류상태의 흐름을 해석하기 위한 Manning의 공식으로부터 산정할 수 있다.

$$Q_{bf} = \frac{1.486 A_b R_b^{2/3} S_c^{0.5}}{n} \quad (3)$$

여기서, A<sub>b</sub>는 통수단면적(ft<sup>2</sup>), R<sub>b</sub>는 통수반경(ft), S<sub>c</sub>는 하도바닥경사(무차원), n은 Manning 조도계수이다. 조도계수 n은 식 (4)와 같이 하도바닥경사(S<sub>c</sub>), 수리수심(D<sub>b</sub>)의 함수로 나타낼 수 있다(Georgakakos 등, 1991).

$$n = 0.36 \frac{S_c^{0.37}}{D_b^{0.15}} \quad (4)$$

식 (3)과 같은 제방 월류유량을 그림 3과 같은 미세 소유역을 바탕으로 모두 계산하기 위해서는 각 소유역 출구의 하도 단면자료(cross sectional data)가 필요하다. 본 연구에서는 이들 계산을 위해 소하천 하도단면을 조사한 결과 400개소 정도의 하도단면 자료를 획득할 수 있었으나, 자연상태의 하도단면 자료, 분할된 소유역과의 일치성, 자료의 신빙성 등을 고려하여 선택된 자연 하도단면 자료와 이에 대한 소유역 매개변수 사이의 지역적 회귀분석(regional regression analysis)을 수행하여 유역매개변수로부터 식 (3)에 필요한 각 하도단면 매개변수를 계산할 수 있도록 그림 4와 같은 최적의 회귀식을 추정하였다. 회귀분석을 위해 총 54개의 자연하도 및 소유역 자료가 사용되었으며, 이들 자료는 하도단면 매개변수인 하폭(B), 수리수심(H), 하

도바닥경사( $S_c$ )와 유역 매개변수인 상류 소유역 면적(A), 하도연장(L), 경사(S) 등을 포함한다.

Site No.	Cross Section area $A_c$ ( $m^2$ )	Top width B (m)	Hydraulic Depth H (m)	Local slope $S_l$ (m/m)	Upstream Area A ( $km^2$ )	Upstream Length L (km)	Upstream slope S (m/m)
1	36,21250	14,80000	2,44679	0,03760	6,63	3,50	0,06696
2	22,75000	9,00000	2,52778	0,08700	2,92	1,50	0,09545
3	56,33750	12,40000	4,54335	0,01600	4,83	3,60	0,04861
4	25,45000	12,40000	2,05242	0,10220	3,69	2,10	0,10101
5	21,30000	10,10000	2,10891	0,06720	1,08	1,40	0,10556
6	13,77000	9,00060	1,52990	0,05400	3,62	3,30	0,12179
7	4,75500	4,30000	1,10581	0,05280	0,62	0,80	0,06852
8	35,71760	17,00190	2,10080	0,06340	6,92	4,90	0,07212

$$B = 2.01A^{0.508}L^{-0.016}S^{-0.45} \quad R=0.65$$

$$H = 1.17A^{0.818}L^{-0.410}S^{-0.11} \quad R=0.56$$

$$S_c = 0.91A^{-0.01}L^{-0.23}S^{-0.714} \quad R=0.73$$

그림 4. 회귀분석에 사용된 지점자료 샘플 및 추정 회귀식

### 3.3 GIUH를 통한 한계유출량 산정

순간단위도(Instantaneous Unit Hydrograph, IUH)란 어떤 유역에 단위유효우량이 순간적으로 내릴 때 유역출구를 통과하는 유량의 시간적 변화를 나타내는 수문곡선을 의미한다. 일반적인 단위도는 반드시 단위유효우량의 지속시간과 동일한 지속시간을 가지지만 IUH는 지속시간이 영(zero)에 가까운 단위유효우량에 의한 것이므로 지속시간을 갖지 않는다. 이러한 가정은 실제로 있을 수는 없지만 수문곡선해석에 사용되는 가상의 개념이다. 지형학적 순간단위도(Geomorphology Instantaneous Unit Hydrograph, GIUH)는 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(Rodriguez와 Valdes, 1979).

$$\textcircled{1} \text{ 하천수 법칙: } \frac{N_\omega}{N_{\omega+1}} = R_B$$

$$\textcircled{2} \text{ 하천길이 법칙: } \frac{L_\omega}{L_{\omega-1}} = R_L$$

$$\textcircled{3} \text{ 하천면적 법칙: } \frac{A_\omega}{A_{\omega-1}} = R_A$$

여기서,  $R_B$ ,  $R_L$ ,  $R_A$ 는 각각 하천분지율(bifurcation ratio), 하천연장비(stream length ratio), 하천면적비(basin area ratio)이며,  $\omega$ 는 하천의 차수,  $N_\omega$ ,  $L_\omega$ ,  $A_\omega$ 는 각각  $\omega$ 차수의 하천의 수, 평균하천길이, 평균유역면적을 나타낸다(Bras, 1990).

Rodriguez와 Valdes(1979)는 IUH의 첨두시간과 첨두유량을 다음과 같이 나타내었다.

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

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

여기서,  $C_3$ ,  $C_4$ 는 단위환산 계수이며, 영국(English) 단위일 경우 각각 0.576과 0.884의 값을 가진다. 또한  $\Pi$ 는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pi = \frac{L^{2.5}}{iAR_L \left[ \frac{S_c^{0.5}}{n B_b^{2/3}} \right]^{1.5}} \quad (7)$$

여기서, L은 하천길이(mi), i는 강우강도(in/hr), A는 유역면적(mi<sup>2</sup>), R<sub>L</sub>은 하천연장비, S<sub>c</sub>는 하도바닥경사, n은 Manning 조도계수이며, B<sub>b</sub>는 하폭이다. 이들 매개변수들은 Q<sub>bf</sub> 산정시 사용된 값들을 동일하게 적용하였다.

이상의 방법으로 계산된 Q<sub>bf</sub> 및 q<sub>br</sub>을 이용하여 식 (2)의 1시간 단위의 headwater 유역 한계유출량을 계산하면 그림 5와 같다. 이들의 빈도분포 해석 결과 최상류 유역으로 갈수록 0.01~0.1 inch의 한계유출량 값을 보이며 가장 많은 분포를 나타내었고, 하류 소유역으로 1.29 inch까지 계산됨을 알 수 있었다. 이와 같은 분포는 상류 유역이면서 유역면적이 작은 소유역일수록 한계유출량값이 작게 산정되는 것으로 나타났다.

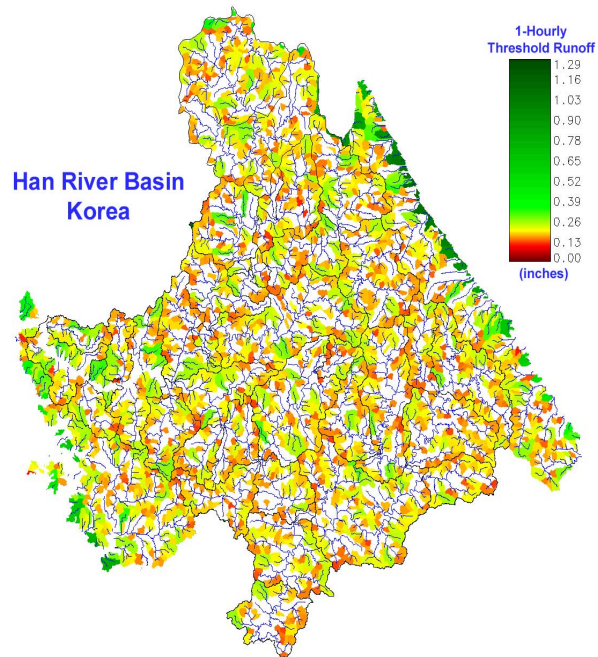


그림 5. 한강유역 1시간 단위의 한계유출량

#### 4. 결 론

본 연구에서는 한강유역 돌발홍수 예경보시스템을 개발하고자 시스템의 수문학적 구성요소인 한계유출량을 한강유역 전역에 대해 산정하였다. 이를 위해 Landsat TM 영상자료로 추출된 DEM 자료로부터 미소 소유역(0.01~56.7km<sup>2</sup>) 및 하천도를 추출하고, 자연하도 및 소유역 매개변수를 이용한 지역적 회귀분석을 통해 Manning의 제방유통 유량(Q<sub>bf</sub>) 및 GIUH의 단위도 침투유량(q<sub>br</sub>)을 계산하였다. 이들 결과를 활용하여 한강유역 headwater 유역에 대한 1시간 단위의 한계유출량을 계산한 결과, 그 값이 0.01~1.29 inch의 범위를 보였다. 향후 토양수분 및 예측 강수량에 따른 돌발홍수 가능성에 대한 평가가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 연구는 기상청에서 시행하는 기상지진기술개발사업의 세부과제 한반도 악기상(집중호우) 감시 및 예측 기술개발로 수행된 것이며 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Bras, R.L. (1990). Hydrology, An Introduction to Hydrologic Science, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Carpenter, T. M., Georgakakos, K. P. (1993). GIS-based Procedures in Support of Flash Flood Guidance, IIHR Report No. 366.
- Rodriguez-Iturbe, I., Valdes, J. B. (1979). "The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response." Water Resources Research, Vol. 15, No. 6, pp. 1409~1419.