

한강유역 한계유출량 산정

Estimation of Threshold Runoff on Han River Watershed

김진훈* / 배덕효**

Kim, Jin Hoon / Bae, Deg Hyo

Abstract

In this study, threshold runoff which is a hydrologic component of flash flood guidance (FFG) is estimated by using Manning's bankfull flow and Geomorphoclimatic Instantaneous Unit Hydrograph (GcIUH) methods on Han River watershed. Geographic Information System (GIS) and 3" Digital Elevation Model database have been used to prepare the basin parameters of a very fine drainage area (1.02~56.41 km²), stream length and stream slope for threshold runoff computation. Also, cross-sectional data of basin and stream channel are collected for a statistical analysis of regional regression relationships and then those are used to estimate the stream parameters. The estimated threshold runoff values are ranged from 2 mm/h to 14 mm/6hr on Han River headwater basin with the 1-hour duration values are 97 % up to 8mm and the 6-hour values are 98 % up to 14mm. The sensitivity analysis shows that threshold runoff is more variative to the stream channel cross-sectional factors such as a stream slope, top width and friction slope than the drainage area. In comparisons between the computed threshold runoffs on this study area and the three other regions in the United States, the computed results on Han River watershed are reasonable.

keywords : threshold runoff, FFG, bankfull flow, GcIUH, GIS

요 지

본 연구에서는 돌발홍수 예경보시스템의 수문학적 구성요소인 한계유출량을 Manning의 제방율류 유량, 지형기후학적 순간단위도 기법을 활용하여 한강유역을 대상으로 산정하였다. 한강유역의 3" DEM 자료를 이용하여 미세소유역 구분(1.02~56.41km²), 하도 및 하도경사를 GIS로부터 추출함으로써 한계유출량 산정을 위한 유역 매개변수를 구축하였다. 또한 유역 및 하도간의 지역적 회귀분석을 위해 실측 소하천 하도단면자료를 수집하여 통계학적으로 최적의 회귀식을 추정하고, 이를 통해 한계유출량 계산의 하도 입력자료를 생성하였다. 이러한 유역 및 하도 매개변수를 통해 한강 headwater 유역에서 산정된 한계유출량은 2mm/h~14mm/6hr의 범위를 보이며, 지속시간 1시간인 경우 97%가 8mm보다 작은 값이고 6시간인 경우 98%가 14mm보다 작은 값으로 산정되었다. 계산된 한계유출량과 유역 및 하도 매개변수사이의 민감도는 유역면적과 같은 유역의 지형인자보다는 하도경사, 하폭, 마찰경사와 같은 하도 지형인자에 비교적 큰 변동성을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 한강유역 한계유출량을 국외의 타 연구사례와 비교한 결과 그 계산결과가 적절한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 한계유출량, 돌발홍수 예경보시스템, 제방율류 유량, 지형기후학적 순간단위도, GIS

* 세종대학교 토목환경공학과 박사과정

Graduate Student, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sejong University, Seoul 143-747, Korea (e-mail: jhcnu@sju.ac.kr)

** 세종대학교 물자원연구소 · 토목환경공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Water Resources Institute, Sejong University, Seoul 143-747, Korea (e-mail: dhbae@sejong.ac.kr)

1. 서 론

최근 기후변화 등 지구환경 변화의 영향으로 짧은 시간에 매우 높은 강도를 가진 집중호우에 의한 돌발홍수의 피해가 빈번히 발생하여 많은 인명과 재산피해를 초래하고 있다. 이러한 피해를 경감하기 위해서는 댐 및 제방 건설 등의 구조적 대책과 홍수예경보 시스템 구축과 같은 비구조적 대책을 병행하여 추진해야 될 것이다. 그러나, 국내 현업에서 사용되고 있는 강우-유출 모형에 의한 홍수예경보 시스템은 강우의 실관측치를 모형의 입력자료로 요구하기 때문에 홍수도달 시간이 매우 짧은 소유역의 돌발홍수를 예보하는 데는 실효성을 거두지 못하고 있는 실정이다. 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.

돌발홍수 예경보시스템은 크게 기상학적인 부분과 수문학적인 부분으로 구성되어 있다고 할 수 있다. 기상학적인 부분은 레이더, 대기수치모형, 위성영상 자료로부터 1, 3, 6 시간 등 강우의 지속시간별 누적 예측 강수량을 산정할 수 있는 부분이다. 수문학적인 부분에는 돌발홍수능을 산정하는 부분과 한계유출량을 산정하는 부분으로 나누어 설명할 수 있다. 돌발홍수능은 현재의 토양수분 조건에서 특정시간 동안 하천의 제방을 월류하는 홍수가 발생할 때까지 앞으로 필요한 누적강수량을 의미하여, 돌발홍수능 산정은 토양수분을 모의할 수 있고 유량의 흐름을 추적할 수 있는 강우-유출 연속모형을 이용하여 산정한다. 이와 같은 돌발홍수능을 결정하는데 있어서 핵심은 임계치 역할을 수행하는 한계유출량의 산정이다. 한계유출량은 토양수분이 완전히 포화된 상태에서 하천유량이 제방을 월류할 때까지 필요한 유효우량인 직접유출량이다. 특정 유역의 토양수분을 채우고 한계유출량을 초과할 수 있도록 산정된 강우 지속시간별 돌발홍수능은 기상학적 요소인 예측강수량과의 상대적인 대소를 비교하여 돌발홍수경보, 돌발홍수주의보 및 돌발홍수해제 등의 돌발홍수 예경보를 실시한다. 이와 같은 돌발홍수 예경보의 정확도는 향후 특정 시간 이내에 예상되는 강수량을 정확히 예보하는 기상부분과 수문학적 돌발홍수능을 얼마나 정확히 산정할 수 있는지에 달려 있으므로, 대상지역의 수문학적 한계유출량을 정확히 산정하는 것은 매우 중요한 일이다.

돌발홍수 예경보시스템을 현업에 활용하고 있는 미국은 NWS 산하 RFC(River Forecast Center)에서 하루에 두 번 FFG 예보를 수행하고 있다. 이러한 FFG 표준 알고리즘은 Sweeney(1992)에 의해 제시되었으며, Fread(1992)는 한계유출량 계산기법에 대한 연구를 수행한바 있다. 또한 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 시스템을 개발하였으며, 신현석 등(2004)은 덕천강 유역을 대상으로 지형기후학적 단위유량도 기법을 이용하여 한계유출량을 산정하고 돌발홍수 발생에 필요한 돌발홍수 기준우량을 산정하였으나 이들 연구는 국내 소규모 하천유역의 제한된 사례연구였다.

따라서, 본 연구에서는 유역 및 하도 매개변수의 지역적(regional) 회귀분석을 통해 Manning의 제방월류유량 산정방법과 지형기후학적 순간단위도(Geomorphoclimatic Instantaneous Unit Hydrograph, GcIUH) 기법을 활용하여 대유역 규모(large watershed scale)의 한강유역 전역에 대한 한계유출량을 산정하고 이들의 수문학적 거동특성을 분석하고자 한다.

2. 한계유출량 개념 및 산정방법

미국기상청(National Weather Service, NWS)에서는 돌발홍수능을 100km² 이내의 지형이 좁고 경사가 급한 유역에서 느리게 유역을 통과하는 호우, 동일한 국지지역 내에서 빠르게 움직이는 집중호우(2시간 동안 100mm 이상)나 태풍으로 인하여 짧은 시간(몇 분 또는 몇 시간)내에 하천수위의 급격한 상승을 유발하는 홍수로 정의하고 있다. 홍수의 발생형태에 따라 원인을 분석하면 크게 제방붕괴로 인한 홍수와 제방월류로 인한 홍수로 구분할 수 있는데, 본 연구에서는 돌발홍수의 주요 발생원인이 제방월류에 의한 것으로 제한한다.

이와 같은 돌발홍수의 개념에서 한계유출량은 소하천의 제방을 월류하기 시작하여 홍수를 일으키기 시작할 때의 유효우량(effective rainfall)으로 정의되며, 이는 유역과 하천의 특성에 따라 좌우된다. 단위도의 기본개념이 특정 단위시간동안 균일한 강도로 유역전반에 걸쳐 균등하게 내리는 단위 유효우량으로 인해 발생하는 직접유출 수문곡선이므로 한계유출량은 Eq. (1)에서와 같이 단위도의 첨두유량 $q_{PR}(cms/km^2/cm)$ 에 유역의 면

적 $A(\text{km}^2)$ 와 유효우량 $R(\text{cm})$ 을 곱한 값이 유역 출구에서의 제방월류 유량 $Q_p(\text{cms})$ 와 동일하다는 개념에 근거하여 산정될 수 있다(Carpenter et al., 1999).

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

제방이 가득 찬 상태의 유량 즉, 제방이 월류하기 시작할 때의 유량(Q_p)은 Eq. (2)와 같은 등류상태의 흐름을 해석하는 Manning의 공식으로부터 산정할 수 있다(Chow et al., 1988).

$$Q_p = Q_{bf} = \frac{B_b D_b^{5/3} S_c^{0.5}}{n} \quad (2)$$

여기서, B_b 는 하천상단의 하폭(m), D_b 는 수리수심(m), S_c 는 하천의 국소 마찰경사(무차원), n 은 Manning의 조도계수이다. Eq. (2)에서 첨자 b 는 제방이 가득 찬 상태를 의미하고 그 때의 유변 P_b 는 광폭수로의 가정으로부터 하폭의 값을 이용한다. 또한, Manning의 조도계수 n 의 일반적인 범위는 0.035 ~ 0.15로 알려져 있으며, $n \geq 0.035$ 일 때 조도계수는 Eq. (3)과 같이 하도경사와 수리수심의 함수로 표현된다(Jarret, 1984; Georgakakos et al., 1991).

$$n = \frac{0.43 S_c^{0.37}}{D_b^{0.15}} \quad (3)$$

한편, Manning의 홍수량 기법을 적용하여 한계유출량을 계산하고자 할 때는 하도단면 자료(channel cross-sectional data)를 필요로 한다. 본 연구에서는 국내 존재하는 한강유역의 하도단면자료를 입수하여 필요한 매개변수를 추출하고, 미계측 유역에 대한 하도단면 자료는 추출된 하도 매개변수와 이에 대응하는 유역 매개변수 사이의 지역적 회귀관계(regional regression relationship) 분석으로부터 산정하였다.

한계유출량 계산에서 단위도의 침투유량 q_{pR} 의 계산은 Rodriguez-Iturbe and Valdes(1979)에 의해 제안된 지형학적 순간단위도(Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph, GIUH) 기법으로 결정하였다(김기욱 등, 2003; 신현석 등, 2004). 순간단위도(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 지속시

간이 영(zero)에 가까운 단위유효우량에 의한 것이므로 지속시간을 갖지 않는다. 이러한 가정은 실제로 있을 수는 없지만 수문곡선해석에 사용되는 가상의 개념이다(윤용남, 1998). 이를 바탕으로 GIUH는 지형학과 수문학의 이론적인 연결에 관심을 기울여 유역의 지형학적 특징에 가장 적합한 평균 유역반응, 즉 수문응답함수(hydrological response function)를 발견하려는 관점에서 GIS와 지형도에서 구할 수 있는 하상지형인자를 이용하여 IUH를 유도한 것이다. GIUH를 이용할 때 유역은 Horton과 Strahler의 차수법칙을 따른다고 가정한다. Rodriguez-Iturbe et al.(1982a, 1982b)은 GIUH의 침투유량과 침투시간에 특성속도(characteristic velocity)를 부여하여 강우-유출 과정의 비선형성을 고려할 수 있는 GcIUH 기법을 개발하였으며, 이를 통해 지속시간 t_R 의 등가 초과강우(uniform rainfall excess)에 대응하는 단위도의 침투유량 및 침투시간으로 변환하였다.

$$Q_p = 2.42 \frac{i A t_R}{\Pi^{0.4}} \left(1 - \frac{0.218 t_R}{\Pi^{0.4}}\right) \quad (4)$$

$$t_{pR} = 0.585 \Pi^{0.4} + 0.75 t_R \quad (5)$$

여기서,

$$\Pi = \frac{L^{2.5}}{i A R_L \left[\frac{S_c^{0.5}}{n B_b^{2/3}} \right]^{1.5}} \quad (6)$$

여기서, L 은 하천길이(km), i 는 강우강도(cm/hr), A 는 유역면적(km^2), R_L 은 Horton의 하천연장비(무차원), S_c 는 마찰경사(무차원), n 은 Manning의 조도계수이며, B_b 는 하폭(m)이다. 이들 수식에서 한계유출량이 강우강도에 그 지속시간의 곱과 같다고($R = i t_R$) 한다면 Eq. (4)는 다음과 같이 표현된다.

$$Q_p = 2.42 \frac{R A}{\Pi^{0.4}} \left(1 - \frac{0.218 t_R}{\Pi^{0.4}}\right) \quad (7)$$

Eq. (7)의 왼쪽 항인 Q_p 에는 Manning의 제방월류 유량(Q_{bf})이 대입되어 한계유출량 R 을 계산할 수 있다. 또한 제방월류 유량의 계산에서와 같이 GcIUH 기법에서 하도단면 매개변수(B_b , S_c)가 포함되므로 이들을 산정하기 위해서는 지역적 회귀관계 분석이 필요하다. 이상과 같은 한계유출량 계산기법을 정리하고 필요한 자료들 간략히 기술하면 Table 1과 같다.

Table 1. Methods and data requirements for threshold runoff estimation

	홍수유량 계산	단위도 계산
계산방법	제방월류 유량 Q_{br}	지형기후학적 순간단위도(GcIUH)
필요자료	· 하도단면자료(지역적 회귀분석)	· 하도단면자료(지역적 회귀분석) · 하천연장비(R_L)의 지역적 추정

3. 대상유역

본 연구에서는 들발홍수 시스템의 수문학적 핵심요소인 한계유출량을 산정하기 위해 Fig. 1과 같은 한강유역을 선택하였다. 한강유역은 북위 36°30' ~ 38°55', 동경 126°24' ~ 129°35'에 걸쳐 한반도 중앙부에 위치하고 있으며, 유역면적 34,473km²(임진강유역 8,118km² 포함 및 북한지역 8,455km² 포함), 유로연장 481.7km, 유역평균폭 55.8km, 유역형상계수 0.119인 남한 제 1의 하천으로서 하천형상은 수지상(dendritic)과 선형(fanshape)이 혼합된 복합상(multiple type) 유역으로 전 국토면적의 약 23%를 차지하고 있다. 유역의 지세는 상당히 복잡하여 동해안과 평행히 남동으로 향하는 태백산맥과 남서로 향하는 소백산맥 등 높은 산맥이 두 개의 방향으로 펼쳐져 있다. 유역의 표고는 북동부의 산악지역은 해발 약 1,700m에 달하며 800m 이상이 약 14%, 200m 이상의 지역이 약 27%이다. 지형은 전반적으로 기복이 심하여 깊게 침식된 협곡에 의하여 비탈꼴

이 분리되어 있는 것이 특징이며 지질은 주로 화강암, 석회암, 편마암으로 되어 있다(건설교통부, 2000).

Fig. 1과 같은 한강유역 전체를 유역구분 단위의 대권역으로 보았을 때 본 대상유역을 중권역으로 구분하면 북한강, 남한강, 한강본류, 한강 동해권 및 서해권, 안성천 유역으로 구분할 수 있다. 북한강은 유역면적이 10,835km², 간천유로연장은 318km이다. 하천은 DMZ의 북측에 있는 유역의 최북부에 수원이 있으며, 남남서로 유하하여 남한강과 합류한다. 북한강의 하폭은 평균 약 400m이다. 또한 유로의 평균경사는 남한강과의 합류점으로부터 약 180km 상류 지점까지가 약 1/1,000이다. 또한, 남한강은 유역면적이 12,514km²로서 간천 유로연장은 375km이며 지역의 동단에 수원이 있으며 충주부근까지 남서로 유하다가 북서로 전류하여 북한강과 합류한다. 남한강의 평균하폭은 600m로 북한강보다 넓은 편이며, 유로의 평균경사는 하류부 200km에서 1/1,250이나 상류로 올라감에 따라 급격히 증가한다.

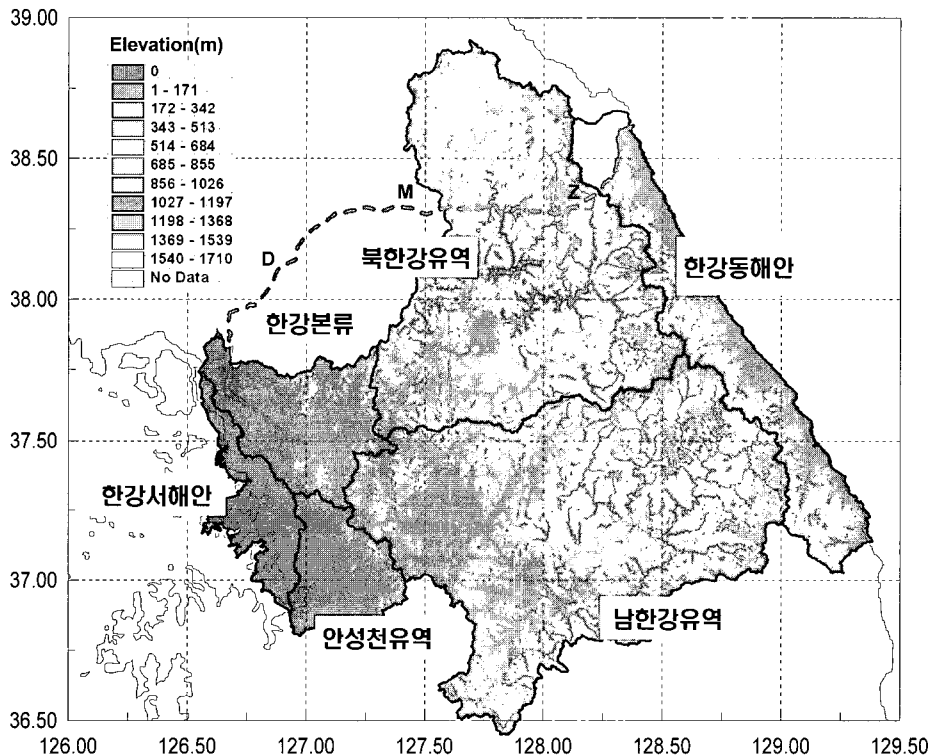


Fig. 1. Han River study area with DEMs

본 연구에서는 GIS/GUI 시스템을 활용하여 유역기반 한계유출량 계산을 위한 미세 소유역(50km² 이하) 분할, 상세 하천도 및 하천경사를 추출하였다. 이러한 GIS 기초자료 생성을 위해 그림 1과 같이 한강유역 3"DEM(Digital Elevation Mode) 자료를 사용하였고, Fig. 2는 한계유출량 산정을 위해 추출된 미세 소유역 및 하천도를 나타낸 것이다. 미세 소유역의 경우 그 면적이 1.02~56.41km²의 범위를 가지고 있으며, 한강유역 전체(동해권, 서해권, 안성천 유역 포함)를 2,984개의 소유역으로 구분하였다. Fig. 3은 본 소유역 매개변수인 면적, 하도연장, 하도경사의 상대빈도 분포를 나타낸 것으로, 소유역 면적의 경우 대상값들의 평균 및 표준편차가 각각 10.32, 7.03km²으로 나타났고 소유역 하도연장의 경우 3.37, 2.38km, 소유역 하도경사는 0.102, 0.098로 계산되었다. Fig. 3에서 한가지 주목할 점은 각 매개변수들 분포가 유역의 지형학적, 기후학적 특성으로 인해 그 값이 증가할수록 지수감소(exponential decay) 형태의 비선형 특성을 가진다는 것이다.

4. 한계유출량 계산

4.1 지역 회귀분석을 통한 하도단면자료 생성

상술한 바와 같이 Manning의 홍수량 및 GcIUH 기

법을 적용하여 한계유출량을 계산하고자 할 때는 두 기법 공히 하폭, 수리수심, 마찰경사와 같은 하도단면 자료를 필요로 한다. 국내의 경우 이러한 하도단면 자료는 건교부(국가 및 지방 1, 2급 하천) 및 행자부(소하천)에서 발간한 하천정비기본계획 보고서 등에서 자료를 획득할 수 있으나, 한계유출량 산정을 위한 대상지점의 일치성은 매우 희박한 실정이다. 따라서 이러한 문제점을 해소하고자 국내 존재하는 363개의 한강유역 하도단면자료를 입수하여 필요한 매개변수를 추출하고, 미계측 유역에 대한 하도단면 자료는 추출된 하도 매개변수와 이에 대응하는 유역 매개변수 사이의 지역적 회귀관계 분석으로부터 산정하였다.

회귀분석은 수집된 하도단면 자료 중 54개 지점의 자연 하도단면 자료를 이용하여 통계학적 소프트웨어인 MINITAB(Minitab Inc., 1989)으로부터 수행되었다. 유역매개변수인 면적(A), 하도연장(L), 유역경사(S)와 수집된 자연 하도단면 자료사이에서 수행된 회귀분석 결과의 최적 관계식은 Table 2와 같다. 회귀분석시 신뢰수준은 95%를 적용하였고, 결정계수(coefficient of determination) R²를 확인함으로써 최적관계식을 도출하였다. 결정계수의 1차함수(R)는 하폭(B_b), 수리수심(D_b), 마찰경사(S_c)에 대해 각각 65, 56, 73%로 계산되었다.

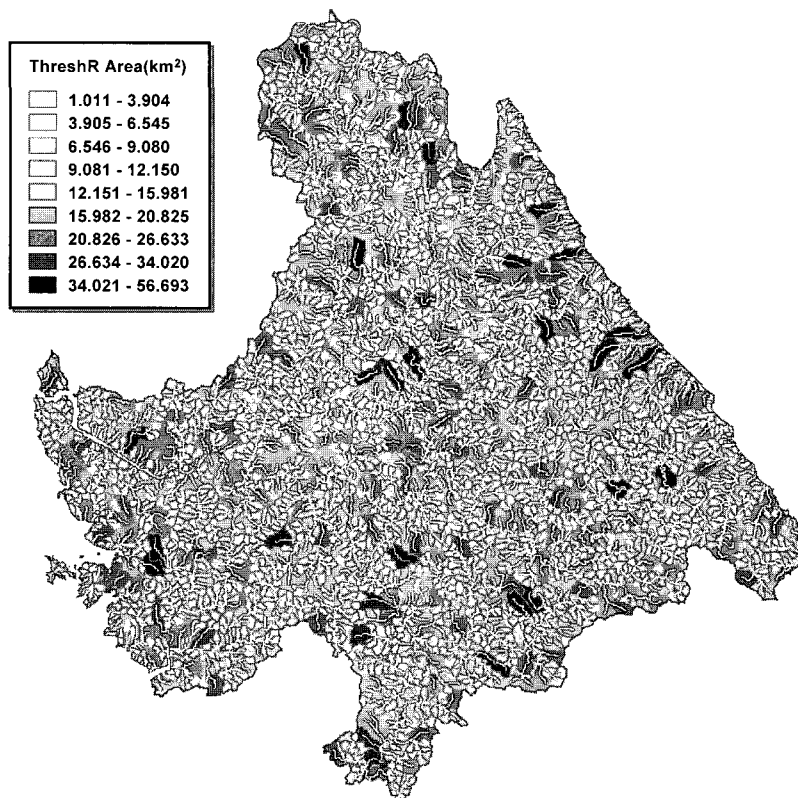
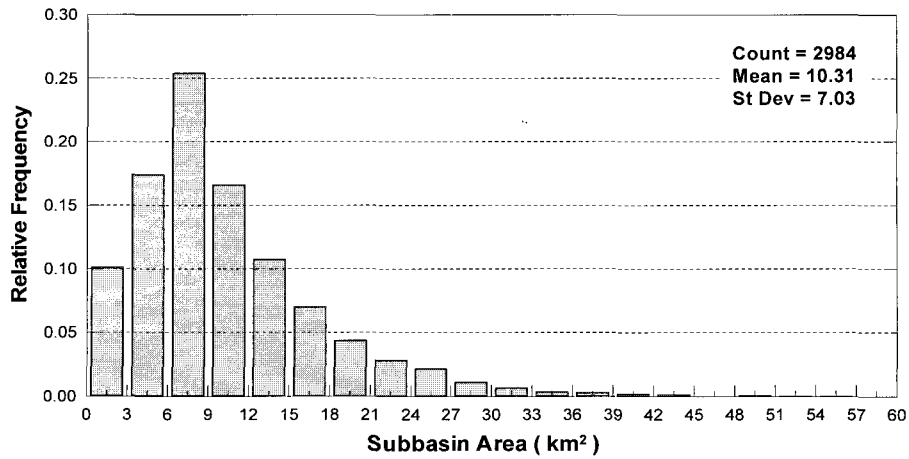
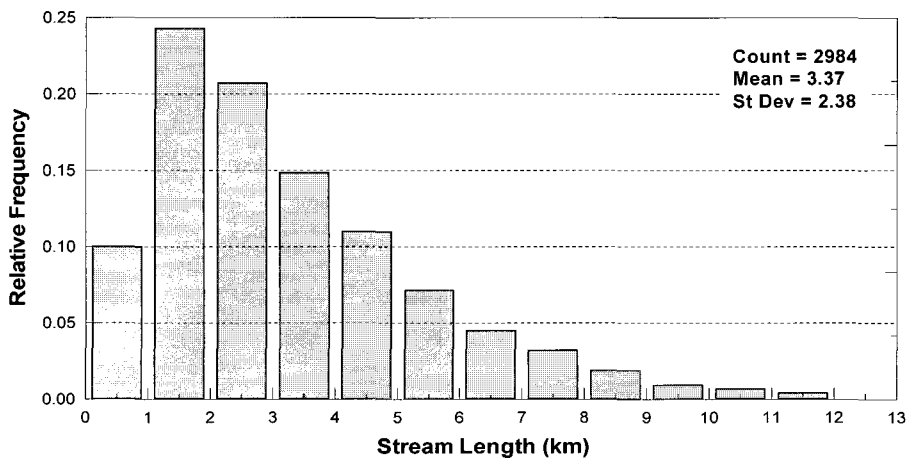


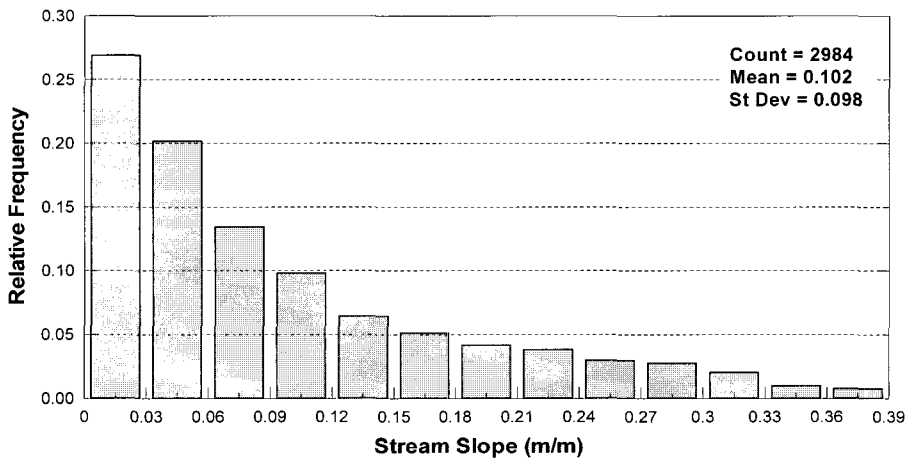
Fig. 2. Delineated subbasins and stream for threshold runoff computation



(a) Subbasin area



(b) Stream length



(c) Stream slop

Fig. 3. Relative frequencies for the subbasin parameters

Table 2. Regression relationship between basin and stream parameters

Parameter	Best-Fit Regression	Coefficient of Determination, R (%)	No. of Cases
B_b	$= 2.01A^{0.508}L^{-0.016}S^{-0.450}$	65	54
D_b	$= 1.17A^{0.818}L^{-0.410}S^{-0.110}$	56	54
S_c	$= 0.91A^{-0.01}L^{-0.230}S^{0.714}$	73	54

Table 2에서와 같은 회귀식의 정확도를 검토하기 위해 회귀식으로부터 산정된 매개변수와 실제관측값의 분포도를 검토하였다. Fig. 4는 이들 결과를 나타낸 것으로, 모든 매개변수에서 비교적 적절한 분포를 보이지만 매개변수들의 평균제곱오차(RMSE)는 하폭, 수리수심, 마찰경사 각각 3.22, 0.76, 0.029 정도의 오차를 내포하는 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 관측된 자연형 하도단면 자료만을 이용함으로써 통계학적으로 샘플수가 다소 부족하였고, 하도단면 실측정 오차, D/B화 과정 중의 오차 등으로 인해 발생한 것으로 판단된다. 향후, 보다 정확한 하도단면의 측정과 광범위한 자료의 활용을 위해 고해상도 위성영상 자료를 활용하는 것도 한 방법이 될 것이다(Carpenter et al., 1999).

4.2 한계유출량 계산

제시된 한계유출량 계산이론과 앞선 계산결과들을 바탕으로 한강유역 전역에 대하여 한계유출량을 계산하

였다. Fig. 5는 1, 6시간 단위의 한계유출량 계산결과를 나타낸 것으로, 여기에 사용된 하도매개변수의 지역적 회귀분석은 소규모 자연하천 유역에서의 하도단면 매개변수와 그 상류유역의 지형학적 특성으로부터 유도되었기 때문에 계산된 한계유출량은 자연상태의 headwater 유역에서만 계산되었다. 또한, 여기서 사용된 Horton의 하천연장비(R_L)는 임의 하천차수(ω)의 평균연장을 다음차수($\omega + 1$) 평균연장으로 나누어 계산할 수 있으며, 자연하천 유역에서 1.5~3.5의 범위를 가지는 것으로 알려져 있다(Rodriguez-Iturbe와 Valdes, 1979). Carpenter et al.(1999)은 한계유출량 계산에서 하천연장비의 민감도가 매우 적은 것으로 제시하기 때문에, 본 연구에서는 1.9의 상수값을 대상 소유역에 동일하게 적용하였다.

계산된 한계유출량 값은 소하천 headwater 유역을 대상으로 2mm/h~14mm/6hr의 낮은 범위를 보인다. 여기서 한계유출량은 토양이 완전포화상태에서 홍수발생에 필요한 유효강우량을 의미하므로 실제 토양수분 상

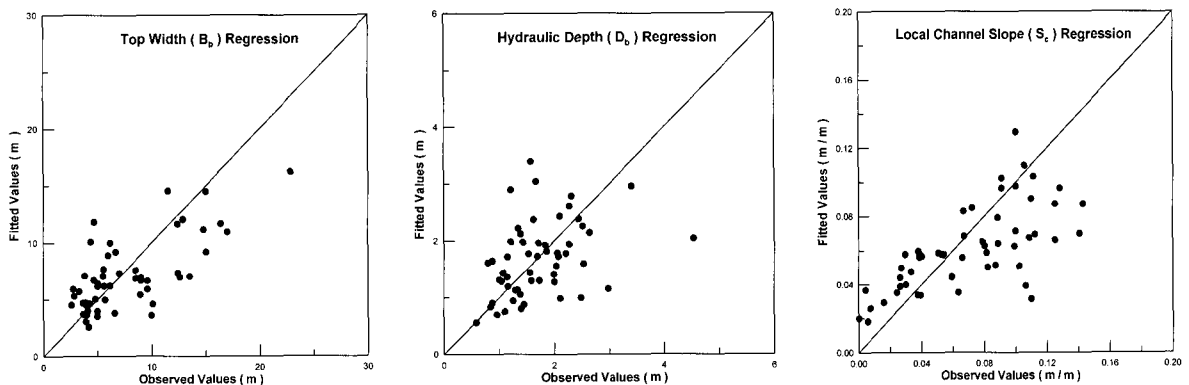


Fig. 4. Regression analysis results for the stream parameters

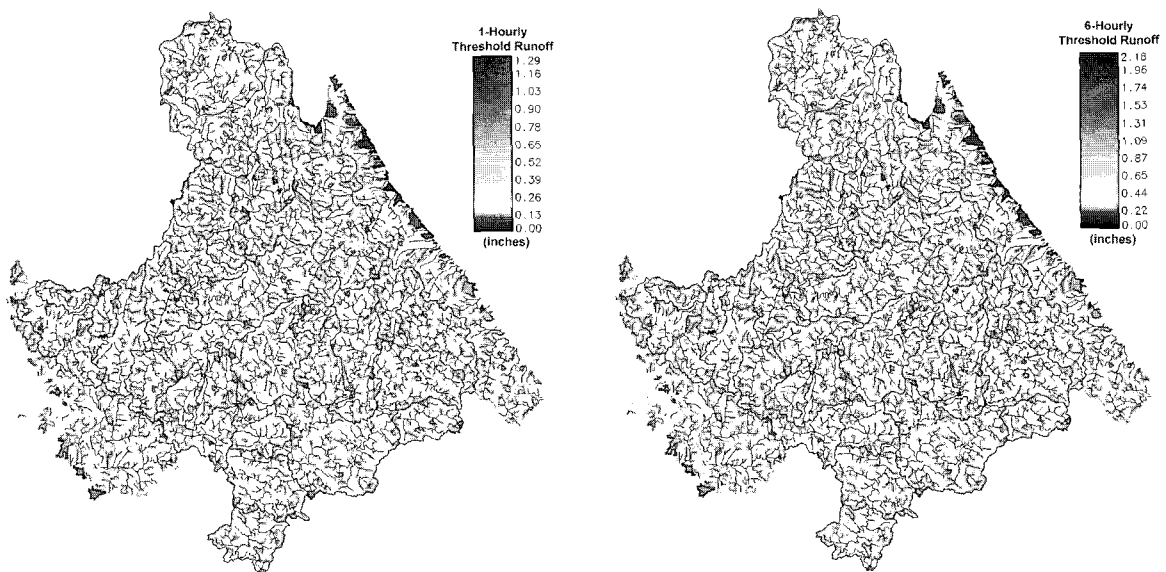


Fig. 5. Threshold runoff results with 1 and 6 hour duration time over the Han River watershed

태를 고려한다면 홍수발생의 예상강수량은 본 연구에서 제시된 한계유출량 값보다 훨씬 큰 값을 주의해야 한다. 이러한 관계 때문에 대상유역의 돌발홍수능을 예측하기 위해서는 토양 저류손실과 증발산량 및 심층 토양 침투수와 같은 손실들을 사전에 결정해야만 한다. Fig. 6은 지속시간 1, 6시간의 한계유출량 값에 대한 빈도분석 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 6시간 한계유출량 값이 1시간 값보다 약 4mm 정도 큰 값으로 계산되었고, 지속시간 1시간이 경우 97%가 8mm보다 작은 값이고 6시간인 경우 98%가 14mm보다 작은 값으로 산정되었다.

한편, Fig. 7은 지속시간 1시간동안의 한계유출량과 지역적 회귀관계식에 사용된 유역 및 하도 매개변수사이의 관계 분포도를 표시한 것이다. 이들 분포도에 따르면 한계유출량은 유역면적과 같은 유역의 지형인자보다는 하도경사, 하폭 및 마찰경사와 같은 하도 지형인자에 비교적 큰 변동성을 보이는 것을 알 수 있다. 특히, 10mm 이하의 한계유출량 분포에서 이들 관계는 더욱 명확하게 나타난다. 이러한 특성을 바탕으로 4.1절의 지역적 회귀관계식을 통한 하도매개변수(B_b , D_b , S_c) 추정결과는 대상유역의 한계유출량 특성에 매우 민감하게 반응함으로 매우 신중한 검토가 요구된다.

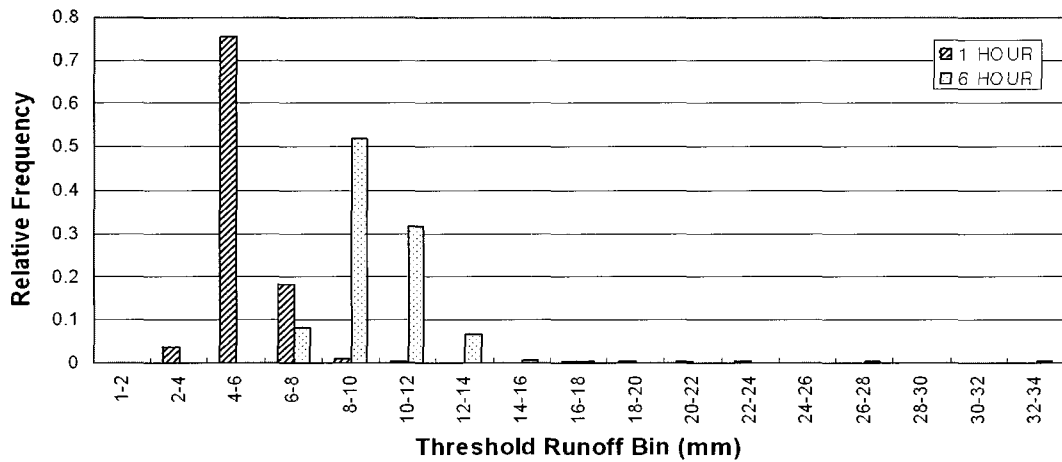


Fig. 6. Frequency analysis of threshold runoff

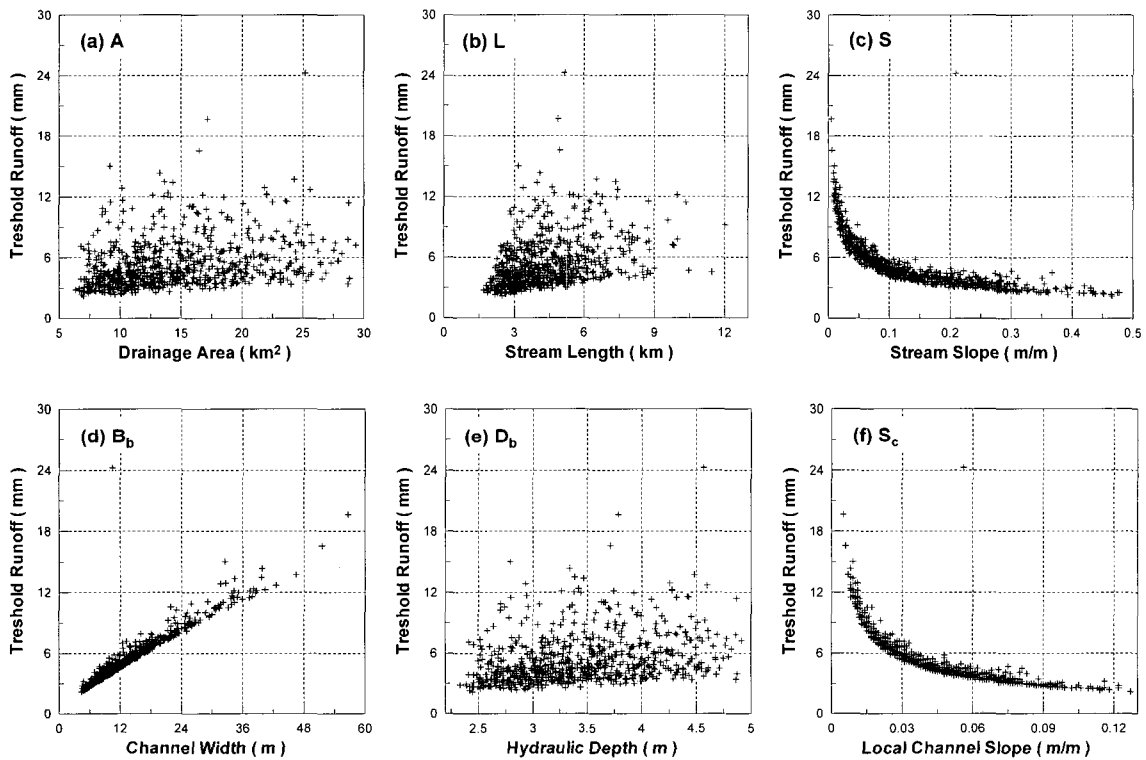


Fig. 7. Distribution diagram between threshold runoff and parameters

Table 3. Various results for threshold runoff around world

지역	California		Iowa		Oklahoma		한강유역	
한계유출량	범위	4~24	범위	4~32	범위	16~72	범위	2~28
	\bar{R}	9.45	\bar{R}	14.20	\bar{R}	33.75	\bar{R}	5.62
	SD	1.47	SD	2.94	SD	6.71	SD	2.13

주: 단위=mm, \bar{R} =평균, SD=표준편차

4.3 한계유출량 비교·분석

이상과 같은 한강유역의 한계유출량은 개념적이고 경험적 방법인 Manning의 제방월류 유량기법과 GcIUH 기법을 이용하여 계산된 제방을 월류하기 위한 유출량으로, 이들의 정확도를 검증하기 위해서는 돌발홍수 다발지역을 조사하여 이들의 분포를 상대적으로 검토하는 것이 최상의 방법으로 사료된다. 왜냐하면, 한계유출량의 대소관계는 토양수분이 완전히 포화된 상태에서 그 값이 작으면 상대적으로 홍수유발 가능성이 높다는 의미를 가지기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 상기 개념을 바탕으로 국내 한강유역의 홍수흔적 자료를 조사한 결과, 그 대상지역이 주로 인적 및 재산피해가 비교적 큰 하천 하류유역으로 나타났기 때문에 본 연구의 소유역 기반 한계유출량의 비교·검토가 용이하지 못한 실정이었다. 또한, 국내 한계유출량 계산결과는 김운태 등(2002)이 평창강 유역을 대상으로 계산한 값으로 국한되기 때문에 이들의 정확도를 평가하기 위하여 국외의 계산결과와 상대적인 비교를 수행하였다.

Table 3은 1시간 지속시간의 한계유출량 분포와 통계치를 Carpenter et al.(1999)의 미국 캘리포니아, 아이오와 및 오클라호마 지역 계산결과와 본 연구의 한강유역 계산결과를 정리하여 제시한 것이다. Table 3에서 한계유출량 계산방법은 본 연구와 동일한 Manning의 제방월류 유량(Q_b)과 GcIUH 기법으로 계산한 결과이다. 이들 결과에 따르면, 한강유역 한계유출량의 범위, 평균 및 표준편차가 각각 2~28, 5.62, 2.13mm로 나타나 미국의 3 지역 계산결과와 비교적 유사한 경향으로 산정되었다.

5. 결론

본 연구에서는 돌발홍수 예경보시스템의 수문학적 구성요소인 한계유출량을 Manning의 제방월류 유량, 단위도의 GcIUH 기법을 활용하여 한강유역을 대상으로 산정하였다. 한강유역의 3" DEM 자료를 이용하여 미세소유역 구분, 하도 및 하도경사를 GIS로부터 추출하여 한계유출량 산정을 위한 유역 매개변수를 구축하

였다. 또한 유역 및 하도간의 지역적 회귀관계식을 위해 실측 하천 하도단면자료를 수집하여 통계학적으로 최적의 회귀식을 추정함으로써 한계유출량 계산에 필요한 하도 매개변수를 생성하고, 이를 통해 한강유역 headwater 유역에 대한 한계유출량을 산정하였다.

GIS 통해 분할된 미세 소유역의 경우 그 면적이 1.0 2~56.41km²의 범위를 가지며 한강유역 전체를 2,984개로 구분하였다. 본 소유역 매개변수인 면적, 하도연장, 하도경사의 상대빈도 분포를 평가한 결과, 소유역 면적의 경우 평균 및 표준편차가 각각 10.32, 7.03km²으로 나타났고, 하도연장은 3.37, 2.38km, 하도경사는 0.102, 0.098로 계산되었다. 각 매개변수들 분포가 유역의 지형학적, 기후학적 특성으로 인해 그 값이 증가할수록 지수감소 형태의 비선형 특성을 가지는 것으로 나타났다. 또한, 유역 매개변수를 이용하여 하도 매개변수를 추정할 수 있는 지역적 회귀분석식의 결정계수는 하폭, 수리수심 및 마찰경사에 대해 각각 65, 56, 73%로 계산되었다. 구축된 입력자료로 산출된 한계유출량은 소하천 유역을 대상으로 2mm/h~14mm/6hr의 범위를 보이며, 지속시간 1시간인 경우 97%가 8mm보다 작은 값이고 6시간인 경우 98%가 14mm보다 작은 값으로 산정되었다. 계산된 한계유출량과 유역 및 하도 매개변수사이의 민감도를 분석한 결과, 10mm 이하의 한계유출량 분포에서 유역면적과 같은 유역의 지형인자보다는 하도경사, 하폭 및 마찰경사와 같은 하도 지형인자에 비교적 큰 변동성을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 특성을 보이는 한강유역 한계유출량을 국외의 타 연구사례와 비교한 결과 그 방법론 및 계산결과가 적절한 것으로 판단된다.

한계유출량 산정에 민감하게 반응하는 하도단면자료를 고해상도 위성영상 자료로부터 추출한다면 보다 광범위하고 정확한 하도 매개변수를 추출할 수 있을 것이며, 또한 이렇게 추정된 한계유출량과 실시간 토양수분 평가 및 대기수치모형의 강수자료를 활용하여 실시간 돌발홍수 예경보시스템을 구축한다면 미래 발생할 수 있는 악기상 재해를 사전에 예방하는데 매우 큰 도움이 될 것이다.

참 고 문 헌

- 건설교통부(2000). **한강홍수예경보(임진강, 안성청 포함)**, 한강홍수통제소, 368p.
- 김기욱, 노정환, 전용운, 유철상 (2003). "GIUH 특성속도를 대한 강우의 영향 분석." **한국수자원학회논문집**, 제36권, 제4호, pp. 533-545.
- 김운태, 배덕효, 조천호 (2002). "돌발홍수예보를 위한 미소유역의 한계유출량 산정." **한국수자원학회논문집**, 제35호, 제5권, pp. 553-561.
- 신현석, 김홍태, 박무중 (2004). "GIS와 GCUH를 이용한 돌발홍수 기준우량 산정의 타당성 검토 연구." **한국수자원학회논문집**, 제37권, 제5호, pp. 407-424.
- 윤용남 (1998). **공업수문학**, 청문각, 656p.
- 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." *J. Hydrology*, Vol. 224, pp. 21-44.
- Carpenter, T.M., 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, IA, Nov., 170 pp.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York, 572 pp.
- Fread, D.L. (1992). "NWS river mechanics: some recent developments." *Proceedings of US/PRC Flood Forecasting Symposium/Workshop*, Shanghai, China, 14-17 April, pp. 81-111.
- Georgakakos, K.P., Unnikrishna, P.V., Bravo, H.R., Cramer, J.A. (1991). "A national system for determining threshold runoff values for flash-flood prediction." *Issue Paper*, Department of Civil and Environmental Engineering and Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, Iowa City, IA.
- Jarrett, R.D. (1984). "Hydraulics of high gradient streams." *J. Hydraulic Engng.*, Vol. 110(11), pp. 1519-1539.
- Minitab Inc. (1989). *MINITAB Reference Manual: Release 7*, Minitab press, Cambridge, MA, 298pp.
- Rodriguez-Iturbe, I., Gonzalez-Sanabria, M., Bras, R.L. (1982a). "A geomorphoclimatic theory of the instantaneous unit hydrograph." *Water Resources Research*, Vol. 18(4), pp. 886-887.
- Rodriguez-Iturbe, I., Gonzalez-Sanbria, M., and Caamano, G. (1982b). "On the Climatic Dependence of the IUH: A Rainfall-Runoff Analysis of the Nash Model and the Geomorphoclimatic Theory." *Water Resources Research*, Vol. 18(4), pp. 887-903.
- Rodriguez-Iturbe, I., Valdes, J.B. (1979). "The geomorphologic structure of hydrologic response." *Water Resources Research*, Vol. 15(6), pp. 1409-1419.
- Sweeney, T.L. (1992). *Modernized areal flash flood guidance*, NOAA Technical Report NWS HYDRO 44, Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA, Silver Spring, MD, October, 21 pp. and an appendix.

(논문번호:05-14/접수:2005.01.17/심사완료:2005.12.08)