

GIS 및 수문지형학적 기법을 이용한 소유역에서의 유출특성 분석
- 지리산 대원사 유역/ 양산천 중심 -
Study on Runoff Characteristics of Small Natural Basin Based on GIS and Hydrogeomorphology

신현석 O, 김홍태 *, 전휘철 **, 서봉철 ***, 강인준****

요지 : 본 연구에서는 GIS 기법을 통하여 구축된 지형 자료와 수문지형학적 기법을 사용하여 미계측 소유역에서의 강우-유출 특성을 분석하는 기법을 제시하였으며, 실제로 경상남도 낙동강 제 1 지류인 양산천과 지리산의 대원사 유역에 적용하여 보았다.

1. 서론

수자원 분야에서 강우-유출의 해석은 홍수의 분석 및 수자원 이용의 측면에서 가장 중요한 문제 중의 하나이다. 특히, 기존에 수위 측정 자료가 존재하는 지역에 대한 유출의 분석은 측정 자료를 통한 정밀한 강우-유출의 분석이 가능하나 유량 기록이 전혀 없는 산악지나 미개발지에 하천에서의 댐이나 제방과 같은 수공구조물이나 소형 교량의 설계 및 수자원 개발을 위해서 강우-유출 관계에 의한 설계 홍수량 및 홍수위의 산정은 상당히 복잡한 과정일 것이다. 또한, 유출이 소하천들에 의해 지배되며 계속 자료가 미비한 지리산, 설악산, 소백산, 속리산 등의 산악형 국립공원에서의 홍수 해석 기법의 개발은 최근 지리산 홍수를 통해서도 그 중요성이 입증되었다. 최근 GIS(Geographic Information System)기법의 발달로 인해 대상유역의 더욱 정밀한 지형 자료의 수집이 가능하게 되었다. 또한, GIS와 수문 모형의 연계를 통한 홍수 및 이수 측면에서의 그 응용도는 점점 높아지고 있다(Bhaster, 1991). 기존의 미계측 소유역을 위한 유출 해석은 Sherman(1962)의 단위도법이 간략한 지형 및 수문 과정의 묘사를 통해 가장 널리 사용되었으며, 이는 HEC-1 모형의 홍수해석의 기본이 되기도 하였다. 최근 GIS와 연계를 통한 많은 연구가 수행되었다.

그러나, 미계측 소유역의 유출 특성을 파악하기 위해서는 수문학적으로 합성단위유량도(synthetic unit hydrograph)법(특히 Snyder, SCS 및 중앙 단위도법, Clark 순간단위도법)이 널리 사용되었으나 그 적용상의 문제점은 아래와 같다.(1) 사용되는 유역 특성계수 및 침투 도달시간 공식 등은 개발된 미국 및 일본의 특수한 지역의 자료에 기인하여 우리나라 지역에 적용이 곤란하다.(2) 단순한 유로 연장 및 경사에 의한 지형-유출 상관 관계로 인한 특수 지형에의 적용에 한계가 있다.(3) 단위도법의 선형적 강우-유출 관계로 인한 자연의 비선형적 특성의 정확한 묘사가 곤란하다. 과거 20여년 동안 수문학 분야에서는 정밀한 지형 자료의 분석을 통하여 순수하게 그를 이용하여 유출 특성을 분석하는 수문지형학(Hydrogeomorphology) 분야의 발전이 상당히 진전되었으며, 특히 Rodriguez-Iturbe 등(1979, 1982)은 Horton 및 Strahler(1957)의 하천의 차수 법칙을 근본으로 하는 지형학적(geomorphological) 및 지형기후학적(geomorphoclimatic) 순간 단위도를 이론적으로 유도하여 지형학과 수문학의 연계를 도모하였다. 이들의 결과가 지형 자료의 정확도에 기인하기 때문에 최근 발달된 GIS기법을 통한 지형 자료의 구축과 수문지형학의 연계는 필수불가결한 관계에 있으며, 이를 통하여 대상 미계측 유역에서의 보다 이론적으로 정밀하고도 유역 특성에 부합하는 유출특성의 분석의 연구는 가치가 있을 것이다.

2. 지형 자료의 분석

본 연구의 대상 유역은 유역면적 243.06 km²의 양산천과 유역면적 34.06 km²의 지리산 대원사 계곡이다. 지리산 대원사 계곡은 1998년 홍수 시 막대한 재산과 인명 피해를 경험한 곳으로 산악형 지형의 대표적인 소유역이다. 본 연구에서는 GIS기법을 사용하여, 양산천 유역은 등고선도(1:50,000)를 디지털화하여 수치고도모형(DEM)을 구축하였으며 지리산 대원사 유역은 환경부 환경정책평가연구원에서 육군지도창에서 제작한 수치지도(1:50000)를 이용하여 수치고도모형(DEM)을 구축하였고 이를 사용하여 수문학적 DEM을 재구성한다. 다음, 구축된 DEM을 사용하여 유역 경사도(basin slope map), 흐름 방향도(flow direction map), 그리고 하천 망도(river network)를 그림 1은 연구 절차도 이며, 그림 2와 3은 양산천 유역 및 지리산 대원사 유역도 및

O 부산대 토목과 조교수, * 부산대 토목과 석사 과정, ** 한국환경정책평가연구원 연구원, **부산대 토목과 석사 과정, *** 부산대 토목과 교수

구축된 Horton 차수에 따른 하천 망도이다. 여기서 Horton 하천망도는 Horton 및 Strahler의 하천 차수 법칙에 따라 아래와 같이 산정하였다.

$$\begin{aligned} \text{분기율 (bifercation ratio):} & R_b = N_{w-1}/N_w, \quad Nw = R_b^{\Omega-w} \\ \text{연장비 (stream length ratio):} & R_l = \bar{L}_w/\bar{L}_{w-1}, \quad \bar{L}_w = R_l^{w-1} \bar{L}_1 \\ \text{면적비 (basin area ratio):} & R_a = \bar{A}_w/\bar{A}_{w-1}, \quad \bar{A}_w = R_a^{w-1} \bar{A}_1 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $w=1, \dots, \Omega$ 는 하천 차수, N_w , \bar{L}_w , \bar{A}_w 는 각각 w 차 하천의 개수, 평균 길이, 그리고 평균 유역면적이다. 표 1 에는 양산천 및 지리산 대원사 유역의 Horton 차수 특성을 도표화 하였으며, 표 2 는 수문지형학적인 응용을 위해 GIS시스템 내에서 구축된 양 유역의 기초 자료들이다. 그림 4 에는 양산천과 지리산 대원사 유역의 Horton의 법칙(1 차 - $\Omega=5$ 차)에 따라 산정된 분기율, 연장비, 그리고 면적비를 보여주고 있다. 그림에서 보여 주듯이 양산천 유역보다는 대원사 유역의 유역 경사가 상당히 크고 상대적으로 분기율 및 면적비가 덜 발달되어 있음을 알 수 있다. 그림 5 에는 양산천과 지리산 대원사 유역의 Hypsometric Curve를 GIS를 통한 DEM을 통하여 정밀하게 구축하여 보았다. 여기서 A곡선은 청년기, B는 장년기, 그리고 C는 노년기 지형의 대표적인 곡선을 나타낸다. 양산천 유역은 유역 및 하천의 발달과정상 상당히 노년기 상태로 소 C의 곡선에 근접하며, 반대로 지리산 대원사 유역은 높은 경사와 낮은 분기율에서도 보여 주듯이 장년기의 하천 발달 과정에 있음을 알 수 있다.

3. 수문지형학적 유출 특성의 분석

순간단위도(Instantaneous Unit Hydrograph)는 순간의 단위강우가 유역 전반에 균일하게 내렸을 때 출구까지 물이 도달하는 시간의 분포(distribution fo travel time)이다. Rodriguez-Iturbe등(1989)은 하천망의 무작위성 확률론적 이론에 따라 아래와 같은 지형학적 순간단위도(Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph, GIUH)의 첨두유량 q_p 와 첨두 도달시간 t_p 를 산정하는 아래의 식을 제안하였다.

$$q_p = (1.31/L_Q) R_l^{0.43} V, \quad t_p = (0.44 L_Q/V) (R_b/R_a)^{0.55} R_l^{-0.38} \quad (2)$$

여기서 V 는 유속과 관련된 동역학적 매개변수(dynamic parameter)로서 유역 어디서나 같다는 가정을 가지고 결정되나 산정이 실제로 곤란하다. 양산천과 지리산 대원사유역을 위하여 위의 2절에서 구축된 지형자료를 바탕으로 그림 6과 표 3과 같이 GIUH를 유속 1, 2, 3 m/sec를 위하여 구축하여 보았다. 표에서 볼 수 있듯이, 유속 3m/sec시의 양산천 첨두값은 0.283 그리고 지리산 대원사는 0.850을 갖아 지리산 유역이 4배 가량의 높은 첨두치를 가짐을 알 수 있었다.

Rodriguez-Iturbe등(1982)은 이의 개선을 위하여 유속은 평균 유효 강우강도 i_r 과 지속시간 t_r 에 종속된다는 원리 하에 수문기후학적(Geomorphoclimatic IUH, GCIUH)를 아래와 같이 유도하였다.

$$q_p = 0.871/\Pi_i^{0.4}, \quad t_p = 0.585 \Pi_i^{0.4}, \quad \Pi_i = L_Q^{2.5}/(i_r A_Q R_l \alpha_Q^{1.5}), \quad \alpha_Q = S_Q^{0.5}/(n b_Q^{2/3}) \quad (3)$$

양산천과 지리산 대원사 유역에 대한 GCIUH를 강우강도를 0.1, 0.5, 1.0, 2 cm로 변화하며 얻은 결과는 그림 7이고 이때의 q_p 와 t_p 는 표 4와 같다. 양산천 유역에서 유속 $V=1$ m/sec시의 GIUH와 강우강도 1 cm의 GCIUH는 거의 동일하게 나타났고 지리산 대원사 유역에서는 유속 $V=1$ m/sec시의 GIUH와 강우강도 0.1 cm의 GCIUH는 거의 동일하게 나타나 이는 개략적으로 양산천 유역에서 1cm의 호우시 유역내 하천에서의 평균 유속은 약 1 m/sec이고 지리산 대원사 유역에서는 0.1cm의 호우시 유역내 하천에서의 평균 유속은 약 1 m/sec임을 간접적으로 알 수 있어, 지리산 대원사 유역이 10배 가량의 빠른 유속을 같은 강우에 대하여 가질 수 있음을 알 수 있었다.

또한 강우강도 i_r 이고 지속시간 t_r 인 GCIUH(Geomorphoclimatic Unit Hydrograph)의 첨두유량 Q_p 와 첨두 도달시간 T_p 는 아래와 같이 표현된다.

$$Q_p = 2.42 \frac{i_r A_Q t_r}{\Pi_i^{0.4}} \left(1 - \frac{0.218 t_r}{\Pi_i^{0.4}}\right), \quad T_p = 0.585 \Pi_i^{0.4} + 0.75 t_r \quad (4)$$

그림 8.에서는 양 유역의 1시간 지속시간 1cm 강우강도의 GCIUH를 보여주고 있다. 더불어 미계측 유역의 단위도를 얻기 위한 전통적인 방법인 Snyder 단위도법과 중안(Nakayasu)의 단위도법(윤용남, 1998, 그리고 SCS에 의해 구축된 단위도를 동시에 도시하였다. 표 5에는 각 방법에 의한 첨두유량과 첨두도달시간을 제시하였다.

양산천 유역에서 침투유량은 GCUH와 Snyder법에서 비슷한 값을, 증안법에서는 높은 값을, 침투도달시간은 Snyder와 증안모형에서는 3-3.3시간의 비슷한 값을 GCUH에서는 6.4 시간이라는 높은 값을 보였고 지리산 대원사 유역에서는 침투유량은 GCUH와 SCS법에서는 비슷한 값을 Snyder법은 아주 작은 값을 증안법에서는 약간 작은 값을, 침투도달시간은 GCUH, Snyder, 증안법에서 1.5-2시간의 비슷한 값을 SCS에서 3시간이라는 약간 높은 결과를 보여 주고 있다. 여기서 양산천과 같은 비교적 큰 유역에서는 GCUH는 가장 작은 침투 유량을 지리산 유역과 같은 급경상의 산악 유역에서는 큰값과 짧은 침투 도달 시간을 보여주고 있다. 1998년 지리산 보고서(박부종, 1998)를 통한 분석과 개략적으로 비교하여 볼 때, Snyder, Nakayasu 법에 의한 결과는 유량을 과소 평가할 수 있으며, 또한 SCS법은 침투유량 도달시간을 과대 평가할 가능성이 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 GIS 기법을 통하여 수문 지형학적인 분석에 필요한 지형 자료 (DEM, 하천망도, Horton도)를 정량적으로 산정하는 기법을 개발하고, 이를 바탕으로 산악지역 소유역 미세측 유역에서의 단위도의 유도를 수문 지형학적인 접근 방법에 의해 시도하여 보았다. 경상남도 양산천 유역과 지리산 대원사 유역을 적용 유역으로 하여 중하천 및 소하천에서의 유출 특성을 파악하고 서로 비교하여 기법의 타당성을 제고하고자 하였다. 또한 단위도 생성시 전통적인 기법과 GIUH 기법으로 부터의 결과를 비교하여 보았다. 이는 차후 다양한 유역과 실 자료와 비교를 통하여 더욱 정량적인 연구의 개발을 시도하기 위한 기본 연구이다.

참고 문헌

- 윤용남 (1998). 공업 수문학, 청문각.
 박부종 등 (1998), 지리산 인원 호우피해조사 및 분석, 행정자치부, 국립방재연구소, Report NIDP-98-01.
 Bhaskar, N. R. (1991). "Hydrologic parameter estimation using geographic information system." J. of Water Res. Plan. and Manage. 115(5), pp492-512.
 Mandelbrot, B.B (1995). "Stochastic Models for the earth's relief, the shape and the fractal dimension of coastlines, and the number-area rule for islands." Proc. Natl. Acad. Sci. 72(10).pp.3825-3828.
 Rodriguez-Iturbe, I. G. Deveto, and J. B. Valdes. (1979). "Discharge response analysis and storm characteristics." Water Resources Research, 5(6), pp.1453-1444.
 Rodriguez-Iturbe, I. M. G. Sanabria, and G. Camaano. (1982). "A Geomorphoclimatic theory of the instantaneous unit hydrograph." Water Resources Research, 18(4), pp. 887-886.
 Strahler, A. N. (1950). "Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis." Am. J. Sci., 248, pp.673-696.
 Tarboton, D. G., B.R. Brass, and I. Rodriguez-Iturbe. (1988). "The fractal nature of river networks." Water Resources Research, 24(8), pp.1317-1322.

표 1. 양산천 및 지리산 대원사 유역의 Horton 분석

유역	차수	N_w	$\bar{L}_w(km)$	S_w (%)	$\bar{A}_w(km^2)$
양산천	1	458	0.520	19.313	-
	2	105	1.011	16.167	1.32
	3	24	1.873	9.153	5.55
	4	6	4.642	1.921	25.35
	5	1	19.811	0.260	243.06
대원사	1	114	0.336	35.544	0.164
	2	28	0.747	35.262	0.665
	3	6	1.803	29.857	2.982
	4	2	1.336	18.2	9.026
	5	1	7.042	14.762	34.687

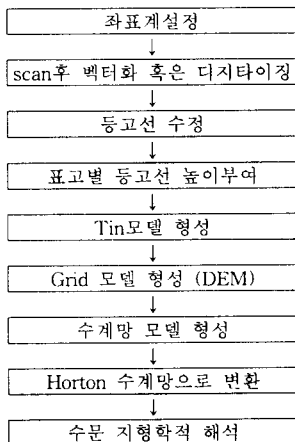


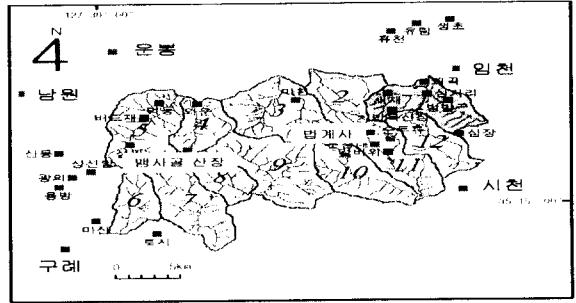
그림 1. 연구 절차도

표 2. 양산천 및 지리산 대원사 유역 지형 자료

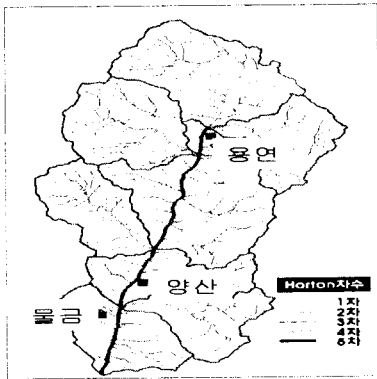
유역명	유역면적, A_{Ω} (km^2)	5차하천 평균폭, b_{Ω} (m)	5차하천 평균경사, S_{Ω}	5차하천 평균연장, L_{Ω} (km)	분기율, R_B	연장비, R_L	면적비, R_A	5차하천 조도계수, n
양산천	243.06	95	0.003	19.81	4.74	2.29	5.23	0.050
대원사	34.69	27	0.148	7.04	3.44	2.66	3.85	0.048



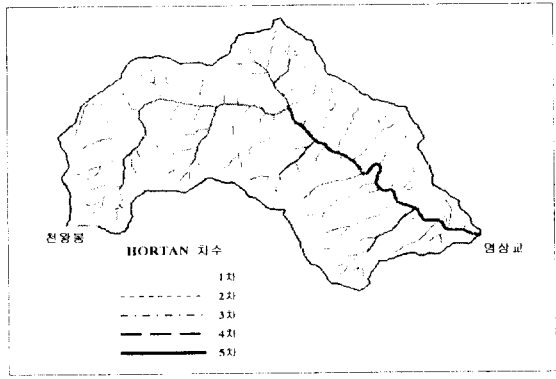
(a1) 양산천 유역 개황



(a2) 지리산 유역 개황

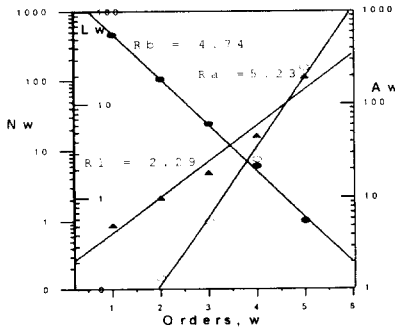


(b1) 양산천 하천망도

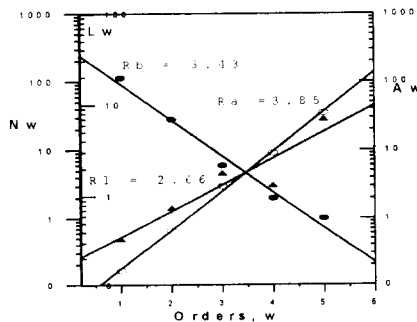


(b2) 지리산 대원사 하천망도

그림 2 와 3. GIS에서 얻어진 양산천 및 지리산 대원사 하천망 및 Horton 망도



(a) 양산천 Horton도



(b) 지리산 대원사 Horton도

그림 4. 양산천 및 지리산 대원사의 Horton 도

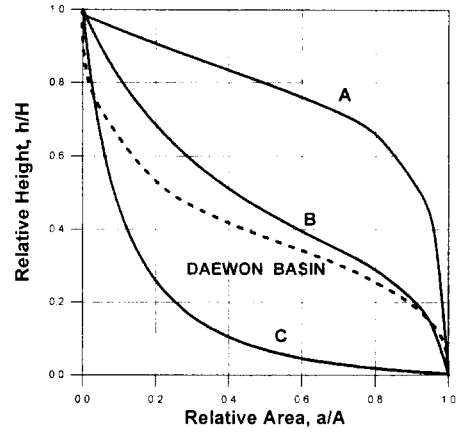
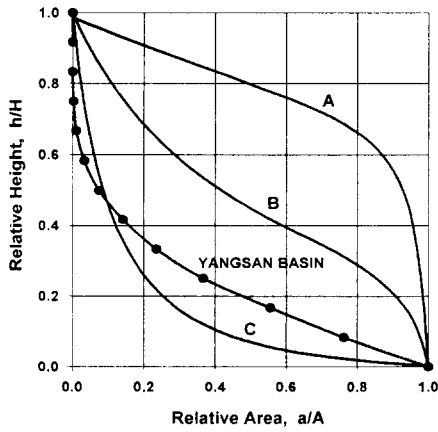


그림 5. 양산천 및 지리산 대원사 Hypsometric Curves

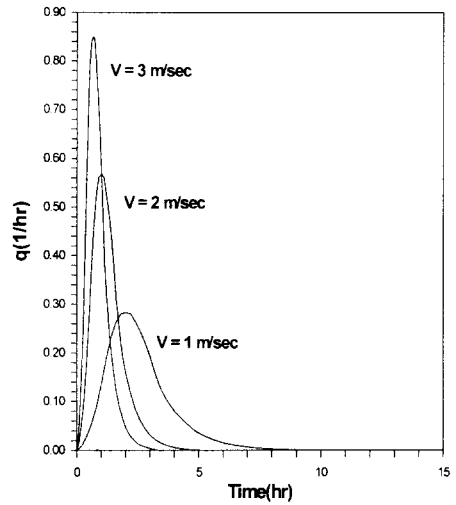
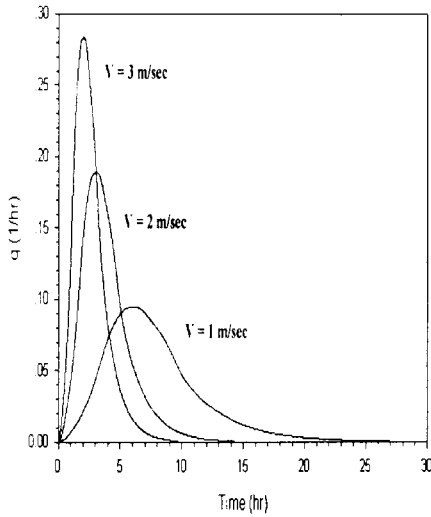


그림 6. 양산천 및 지리산 대원사 유역의 GIUH

표 3. 양산천 및 지리산 대원사 유역의 GIUH

유속 V(m/s)	양산천		지리산 대원사	
	$q_p(1/hr)$	$t_p(hr)$	$q_p(1/hr)$	$t_p(hr)$
1	0.094	6.032	0.283	2.005
2	0.189	3.016	0.567	1.002
3	0.283	2.011	0.850	0.668

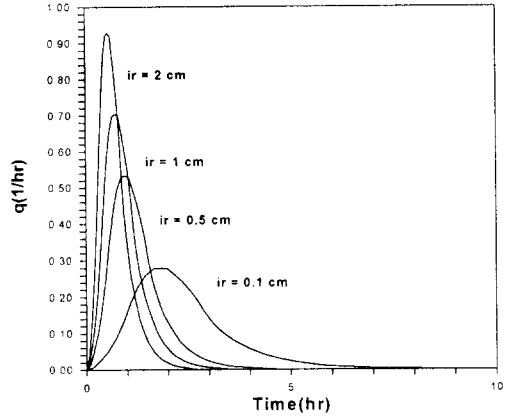
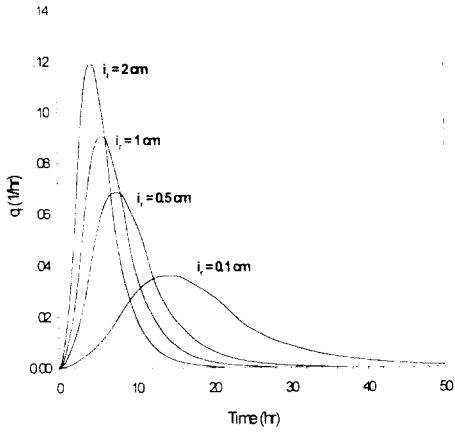


그림 7. 양산천 및 지리산 대원사 유역의 GCIUH

표 4. 양산천 및 지리산 대원사 유역의 GCIUH

강우강도 i (cm)	양산천		지리산 대원사	
	q_p (1/hr)	t_p (hr)	q_p (1/hr)	t_p (hr)
0.1	0.036	14.201	0.281	1.816
0.5	0.068	7.460	0.534	0.954
1	0.090	5.653	0.705	0.723
2	0.119	4.284	0.930	0.548

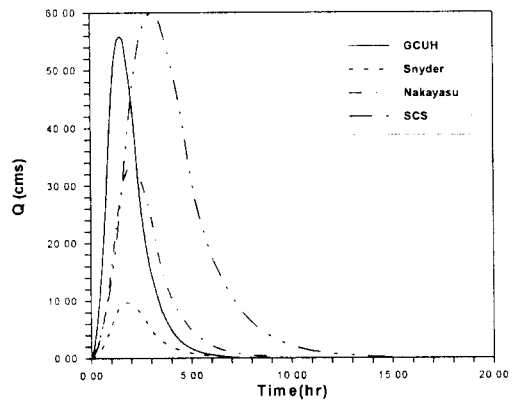
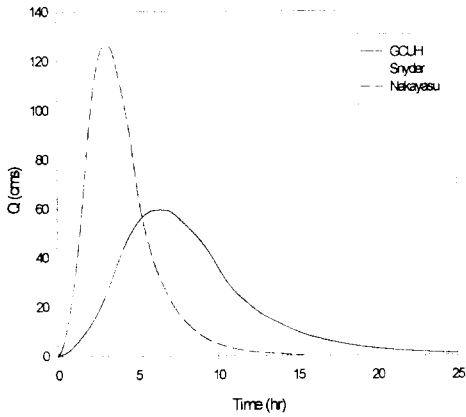


그림 8. 양산천 및 지리산 대원사 유역의 첨두유량과 첨두도달시간

표 5. 양산천 및 지리산 대원사 유역의 첨두유량과 첨두도달시간

UH종류	양산천		지리산 대원사	
	Q_p (cms)	T_p (hr)	Q_p (cms)	T_p (hr)
GCIUH	59.493	6.403	55.940	1.473
Snyder	63.858	3.288	9.664	1.825
Nakayasu(중안)	126.099	3.083	33.568	2.075
SCS	---	---	59.952	3.062