

유역순간응답해석시 수로망 및 사면의 수리특성인자의 역할

김재한* · 윤석영**

1. 서론

유출해석은 강우-유출간의 상호관계를 규명한 강우-유출모형으로 수행된다. 강우-유출해석에는 단위도이론, 순간단위도의 개념모형, 계(system)분석에 의한 선형, 비선형응답모형, 지형학적 순간단위도 등이 주로 적용되었다.

그러나, 위에서 제시한 모형들은 유출을 유발시키는 사면과 물입자를 이동시키는 수로망으로 구성된 배수구역의 물리적 특성중의 하나인 유량의 시간-공간적인 분포를 구체적으로 설명하지 못하고 있는 실정이다

이는 유역규모(basin scale)에 의한 수문과정을 분석함으로써 이에 대한 설명이 가능하다. (1) 유역규모는 수로의 수리학적 요소(open channel hydraulics)와 유역의 수문학적 요소(river basin hydrology)를 결합시킨 총괄적 유출해석을 의미하는 것으로, 전자는 수로에서의 물의 이동에, 후자는 물의 이동시 수 많은 수로로 구성된 수로망에서의 저류효과로 인한 감쇠에 관련된다. 결과적으로 수로망의 기하학적 특성은 유역규모에 의한 유출해석에서 매우 중요한 역할을 하며, 수로 각각의 응답보다는 전체 수로망의 응답으로 분석된다.

Kirkby⁽²⁾, Mifflin⁽³⁾, Troutman⁽⁴⁾, Mesa⁽⁵⁾ 등은 수로의 지체효과를 고려해 줄 수 있는 선형모형과 유량의 분포를 나타낼 수 있는 함수를 설정함으로써 유역응답을 유도할 수 있는 가능성을 제시해 주고 있다.

본 연구는 수로와 사면이 상호 독립적이라는 가정하에, 유역의 수로기하학적특성과 수리학적 인자로 매개변수를 산정할 수 있는 수로망응답과 사면에서의 지체시간을 이용하여 유도한 사면응답을 동시에 적용시켜 유역응답을 유도하였다.

2. 유역응답

2.1 모형의 구성

유역을 수로망과 사면으로 구분하여 각각 선형수로(linear channel)와 선형저수지(linear reservoir)개념을 조합시켜 모형을 구성하였다. 물입자의 체류시간이 수로망에서 T_N , 사면에서 T_H 인 확률밀도함수를 각각 $f_n(t)$, $f_h(t)$ 라 하면, 유역에 대한 체류시간은 $T_B=T_N+T_H$ 와 같다. 이때 유역응답함수 (basin IUH, $f_B(t)$)는 수로망응답함수, $f_n(t)$ 와 사면응답함수, $f_h(t)$ 를 식(1)과 같이 회선적분시킴으로써 유도된다. (3) 이는 서로 독립적인 관계를 갖는 무한히 많은 물입자가 사면과 수로에서 체류되는 시간의 확률밀도함수의 합으로 나타낼 수 있음을 의미한다. 모형을 도식화하면 그림(1)과 같다.

$$f_B(t) = f_n(t) * f_h(t) \quad (t \geq 0) \quad (* : \text{convolution}) \quad (1)$$

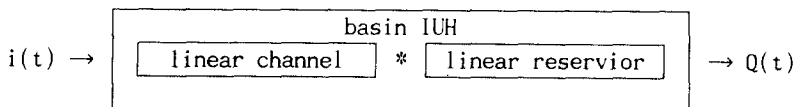


Fig.1 Block diagram of a basin IUH

*정회원 : 충남대학교 공과대학 토목과, 교수

**정회원 : 한국건설기술연구원 수자원연구실, 선임연구원

2.2 수로망응답함수

2.2.1 선형수로응답함수의 유도

선형수로응답함수는 실제적으로 수로추적에 가장 많이 사용되는 확산식을 적용하여 유도하였다. 확산식은 선형화된 St.Venant식을 거리에 관한 2계미분식으로 나타냄으로서 유도되며 식(2)의 초기조건을 이용하여 Laplace변환을 시켜 풀게되며, 해는 식(3)과 같다.

Gupta등⁽⁶⁾은 $h(X, t)$ 를 유역출구로부터 거리(X)만큼 떨어진 곳에 발생한 순간입력(a delta function input)에 의해 시간 t 에 출구에서 발생한 응답이라 하였다.

$$h(X, 0) = 0 \quad \text{for } X > 0 \quad (2a)$$

$$h(0, t) = \delta(t) \quad \text{for } t \geq 0 \quad (2b)$$

$$h(X, t) = \frac{X}{\sqrt{2\pi Dt^3}} \text{EXP} \left\{ -\frac{(X-bt)^2}{2Dt} \right\} \quad (3)$$

여기서,

$$b = 1.5 V_0.$$

$$D = \frac{V_0^3}{gS_0 F_0^3} (1-F_0^2)$$

$$F_0 = \frac{V_0}{\sqrt{gY_0}}$$

b 는 홍수파의 이동에 관련되는 계수(m/s), D 는 홍수파의 감쇠를 나타내는 확산 계수이다. X 는 유역출구에서 임의 상류지점까지의 거리(m), t 는 시간(hr), F_0 는 정상류상태의 froude수, V_0 는 정상류상태의 유속(m/s), Y_0 는 정상류상태의 수심(m), S_0 는 수로경사, g 는 중력가속도(m/s²)이며 모두 양(+)의 값을 갖는다.

2.2.2 초기유량분포함수

초기유량분포함수는 유역의 출구에서 임의 거리(X)만큼 떨어진 지점에서 유발하는 유량의 분포를 나타내는 확률밀도함수이며, 유역의 수로망으로 유도된다.

유량분포함수의 유도를 위해서는 Kirkby⁽²⁾에 의해 제시된 Width function의 도입이 필요하다. Width function은 계산될 수문곡선의 형상과 첨두유량의 결정에 중요한 영향을 주는 함수로 유역출구로부터 임의 거리(X)만큼 떨어진 곳에 있는 링크(Link)의 수($N(X)$)로 계량된다.

초기유량분포함수, $W(X)$ 는 $N(X)$ 를 수로의 총길이(L_T)로 나누어 줌으로서 식(4)와 같이 유도된다. 출구에서 거리(X)에 위치한 지점의 링크의 수만큼 합산시킴으로서 그 지점에 할당되는 비율이 계산된다.

$$W(X) = \frac{1}{L_T} N(X) \quad (4)$$

임의의 유역에서 출구점에 가까울수록 Magnitude는 커지며, 본류 및 지류의 상류로 갈수록 Magnitude는 적어짐을 알 수 있다. 이는 동일한 기능을 가진 수로라 할지라도 Magnitude가 큰 하류쪽 수로가 Magnitude가 작은 상류쪽보다는 상대적으로 유

량의 이동에 주된 기능을 한다고 볼 수 있으므로, 각 링크에 부여된 Magnitude를 가중치로 하는 가중된 초기유량분포함수를 식(5)와 같이 유도할 수 있다.

$$W^*(X) = \frac{1}{F} \frac{1}{L_T} \sum_{k=1}^{2M-1} \frac{1}{M_k} \mu(X; \alpha_k, \beta_k) \quad (5)$$

여기서, F는 W*의 면적이 1이 되도록 하는 값이며, M_k는 k번째 링크의 Magnitude이다. $\mu(X; \alpha_k, \beta_k)=1$ 이며, 이것은 해당구간에 있는 각 링크에 1단위가 할당되는 것을 뜻한다. α_k, β_k 는 k번째 링크의 상하류 끝에서 출구까지 거리이다.

2.2.3 수로망응답

수로망응답을 구하기 위해서는 선형수로응답함수(h(X, t))와 초기유량분포함수(W*(X))를 하나의 식으로 나타내는 것이 필요하다. 이를 위해 두 함수를 곱한다음, 거리에 대해 적분하면, 수로망응답함수(f_n(t))가 식(6)과 같이 구해 진다. (5)

$$f_n(t) = \int_0^{\infty} h(X, t) W^*(X) dX \quad (6)$$

2.3 사면응답함수

2.3.1 사면의 체류시간 밀도함수

선형저수지 모형은 하나의 유역을 저수지로 가상하여 유출량을 추정하는 방법으로 저유량은 유출량에 직접 비례한다고 가정하면, 순간 발생한 단위량의 입력에 대해 선형저수지의 응답(f_h(t))은 식(7)과 같다.

$$f_h(t) = \frac{1}{K} \cdot e^{-t/K} \quad (7)$$

여기서, K는 물입자의 평균체류시간이다.

4.2 평균체류시간 K_h의 결정

식(7)를 간단히 하기 위해 1/K를 K_h로 대치하면 식(8)과 같이된다.

$$f_h(t) = K_h \cdot \exp(-K_h \cdot t) \quad (8)$$

사면에서 평균체류시간의 역수(K_h)는 유효우량(i(t))과 수로망응답(f_n(t))을 회선적분시켜 산출한 수로망유출수문곡선(Q_n(t))과 직접유출수문곡선(Q(t))의 1차모멘트의 차로 산정된다. 1차모멘트의 차는 사면에서 기인된 체류시간(T(hr))이라 할 수 있으며, 식(9)와 같은 관계를 가진다.

$$T_{(HILL)} = T_{(DIR)} - T_{(CHANNEL)} \quad (9)$$

여기서, T_(HILL)는 사면응답의 1차모멘트, T_(DIR)는 직접유출수문곡선의 1차모멘트, T_(CHANNEL)는 수로망유출수문곡선의 1차모멘트이다. 따라서, T_(HILL)는 식(7)의 K값과 같으므로 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{1}{K_h} = T_{(HILL)} \quad (10)$$

사면의 평균유속(V_h(m/h))은 식(11)를 적용하고, 유역의 평균사면길이(L_c)는

식(12)를 이용하여 유역의 평균사면길이를 산정하였다. Mesa등(5)에 의하면 사면에
서의 유속은 0.3~100m/h의 범위에 있는 것으로 제시하고 있다.

$$V_h = \frac{L}{T_{(HILL)}} \quad (11)$$

$$L = \frac{1}{2D_d} \quad (12)$$

여기서, D_d 는 유역밀도(Drainage density)이며, 식(13)과 같다.

$$D_d = \frac{\sum L_s}{A} \quad (13)$$

$\sum L_s$ 는 유역의 총 하천길이(m)이며, A 는 유역의 총면적(m^2)이다. 따라서, K_h 는
식(14)와 같이 유도되어 진다.

$$K_h = \frac{V_h}{L} = 2 \cdot D_d \cdot V \text{ (hr}^{-1}\text{)} \quad (14)$$

3. 유출수문곡선의 산정

유출수문곡선은 각 유역에서 산정된 유역응답과 유효우량을 식(15)을 이용하여
회선적분시킴으로서 산정된다.

$$Q(t) = \int_0^t f_B(t-\tau) i(\tau) d\tau \quad (15)$$

여기서, $Q(t)$ 는 직접유출량, $f_B(t)$ 는 유역응답, $i(t)$ 는 유효우량이다.

4. 유역대표응답

유역응답을 결정하는 매개변수는 유속, froude수 및 평균체류시간이다. 이들 매
개변수들은 각 호우사상으로부터 산정하여, 이들을 산술평균한 값을 수로망응답함수
와 사면응답함수에 대입한 후, 회선적분시켜 유역대표응답을 유도한다.

지금까지의 계산절차를 흐름도로 나타내보면 그림(2)와 같다.

5. 적용 및 분석

5.1 강우-유출 및 지형자료

유역응답함수의 적용성을 검토하기 위하여, 국제수문개발 대표시험유역인 낙
동강수계 위천유역의 동곡, 고노, 미성, 병천지점과 금강수계 보청천 유역의 이평지
점을 대상유역으로 선정하였다. 강우-유출자료는 표(1)과 같이 수자원관리기법
개발조사보고서(13)에 수록되어 있는 1시간 간격의 관측자료를 이용하였다. 직접
유출량은 수평직선분리법, 유효우량은 Φ -index법을 적용하였으며, 유역응답과 차
원을 고려하여 유효우량을 적용하였다. 지형인자는 1/50,000 지형도를 이용해 구하
였다. 그 결과는 표(2)와 같다.

초기유량분포는 대상유역 모두 식(4), 식(5)를 이용하여 구성하였으며, 그중 동
곡지점의 초기유량분포는 그림(3)와 같다.

5.2 유역응답의 산정

유역응답은 계산 및 관측수문곡선과의 비교를 통해 첨두치와 첨두유량발생시
간의 상대적오차가 가장 작을 때, 수로망응답함수와 사면응답함수의 매개변수를 결

정하여 산정하였다. 호우사상별 유역응답의 산정결과는 표(3)과 같다.

5.3 유역대표응답의 산정 및 적용성 검증

유역대표응답은 호우사상별로 결정된 수로망응답과 사면응답의 매개변수를 평균하여 구한 값을 대표치로 결정하였다. 그 결과, 채택된 유역대표응답의 매개변수는 표(4)와 같으며, 이들을 그림으로 나타낸 것이 그림(4)~그림(8)이다. 유역대표응답의 적용성을 검증하기 위해 위천의 경우, 동곡, 고노, 미성지점은 호우사상(5)을, 병천지점은 호우사상(6)번을, 보청천의 경우, 호우사상 (4)번을 적용한 결과는 그림(9)~그림(13)과 같다.

6. 결 론

1. 유역규모에 의한 총괄적 유출해석이론에 의하여 물의 이동과 감쇠에 영향을 주는 배수유역의 수리, 수문학적 특성을 규명하였으며, 이들 특성으로 부터 산정된 수로망과 사면의 응답함수를 이용해 유역응답(Basin IUH)을 유도할 수 있었다.

2. 유역응답의 유도에 적용된 선형수로응답함수와 지수분포함수는 각각 수로와 사면에서의 물입자의 확률밀도함수로서 적용성이 우수하며, 이들은 계산칩두유량 발생시간과 그 양에 지대한 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

3. 유역면적이 크고 수로망이 잘 발달된 유역일수록 수로망응답함수의 적용범위가 증가하였으며, 관측수문곡선의 재현성 역시 우수하였다. 수로의 기하학적 특성(폭함수)으로 구성되는 초기유량분포에 의해 해당 유역의 지형학적 특성이 유역응답에 반영됨을 확인하였고, 초기유량분포가 가중되었을때 수로망응답함수의 적용범위가 증가하였다.

4. 수로망응답함수와 사면응답함수를 이용해 수로와 사면에서의 유속을 간단히 산정할 수 있었으며, 사면에서의 유속은 배수밀도에 큰 영향을 받고 있음을 확인하였다.

5. 초기유량분포함수의 분할거리는 유량분포의 형상을 반영시킬 수 있는 정도의 분할거리를 선정하여 적용할 것을 제시한다.

참 고 문 헌

- 1) Gupta, V.K. and Waymire, E., "On The Formulation of an Analytical Approach to Hydrologic Response and Similarity at The Basin Scale.", J. hydrology, Vol.65, 1983, pp.95-123.
- 2) Kirkby, M.J., "Tests of The Random Network Model, and its Applications to Basin Hydrology.", Earth Surf. Processes, Vol.1, 1976, pp.197-212.
- 3) Mifflin, E.R., "On The Role of Network Geometry in The Basin Response" M.S. Thesis, University of Mississippi, 1984.
- 4) Troutman, B.M. and karlinger, M.R. "Unit Hydrograph Approximations Assuming Linear Flow through Topologically Random Channel Networks.", Water Resour. Res., Vol.21, No.5, 1985, pp.743-754.
- 5) Mesa, O., and Mifflin, E.R. "On The Relative Role of Hillslope and Network Geometry in Hydrologic Response.", Scale Problems in Hydrology, Reidel Publishing, 1986.
- 6) Gupta, V.K., E.C. Waymire, and I. Rodriguez-Iturbe, " On Scales, Gravity and Network Structure in Basin Runoff", Chapter 8, in: Scale Problems in Hydrology (ed.) I. Rodriguez-Iturbe, V.K. Gupta, E.F. Wood, Reidel Publishing,

1986.

- 7) Dooge, J.C.I., and Harley, B.M. "Linear Routing in Uniform Open Channels" Internatl. Hydrol. Symposium., Compt. Rent. Fort Collins, Colo., Vol. 1, 1967, pp. 57-63.
- 8) Dooge, J.C.I., "Linear Theory of Hydrologic Systems.", Tech. Bul. 1468, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, 1973.
- 9) Horton, R.E., "Erosional Development of Streams and their Drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology.", Bulletin, Geol. Soc. of Am., Vol. 56, 1945, pp. 275-370.
- 10) Kishen, D.M. and Bras, R.L., "The Linear Channel and its Effect on The Geomorphologic IUH.", J. Hydrology, Vol. 65, 1983, pp. 175-208.
- 11) Feller, W., "An Introduction to Probability Theory and its Applications, II, John Wiley, New York, 1971.
- 12) Gupta, V.K. and Mesa, O.J., "Runoff Generation and Hydrologic Response via Channel Network Geomorphology - Recent Progress and Open Problems.", J. Hydrology, Vol. 102, 1988, pp. 3-28.
- 13) 건설부, "수자원관리기법 개발연구조사사업 보고서 별책부록 홍수수문 자료집", 1991.

Table(1) Storm-runoff events of selected drainage basin

BASIN	STATION	EVENT	DATE	REMARK	
Wi stream	Donggok	(1)	1986. 7. 21 - 7. 23	data for derivation	
		(2)	1987. 7. 14 - 7. 18		
	Gono	(3)	1989. 7. 11 - 7. 14		
		(4)	1989. 8. 21 - 8. 24		
	Byeung-chun	(5)	1984. 9. 2 - 9. 5		data for verification
		(6)	1986. 9. 19 - 9. 23		
Bo-cheong stream	Yipyong	(1)	1984. 6. 16 - 6. 22	data for derivation	
		(2)	1986. 7. 9 - 7. 21		
	(3)	1987. 8. 20 - 8. 23			
	(4)	1989. 7. 25 - 7. 29	data for verification		

Table(2) Watershed characteristics of selected drainage basins

BASIN	STATION	AREA (km ²)	TOTAL LENGTH (km)	SLOPE	HILLSLOPE LENGTH (m)	MAGNITUDE
Wi stream	Donggok	33.8	37.3	0.0310	452	26
	Gono	109.8	143.3	0.0149	383	106
	Miseung	171.7	271.3	0.0156	316	205
	Byeung-chun	300.3	481.4	0.0093	312	365
		Bocheong stream	Yipyong	76.0	101.5	0.0156

Table(3) Parameters of network response function and hillslope response function for selected drainage basins

BASIN	STATION	EVENT	CHANNEL NETWORK RESPONSE				HILLSLOPE RESPONSE	
			V ₀ (m/s)	F ₀ No	DIST-ANCE	BASE TIME	K _h (1/hr)	VELOCITY (m/hr)
Wi stream	Donggok	(2)	0.30	0.10	100	5	0.2150	97.3
		(4)	0.35	0.10	100	5	0.2079	94.1
	Gono	(1)	0.63	0.10	200	6	0.1984	76.0
		(3)	0.63	0.15	200	6	0.2208	84.3
		(4)	0.70	0.15	300	6	0.1678	64.3
	Miseung	(1)	0.80	0.10	300	8	0.1972	62.3
		(3)	0.93	0.10	300	8	0.1869	56.3
	Byeung-chun	(1)	0.68	0.10	300	13	0.1996	62.3
(3)		0.98	0.35	300	10	0.1708	63.2	
Bo-cheong stream	Yi-pyeong	(1)	0.58	0.10	150	7	0.1236	46.9
		(2)	0.32	0.10	150	12	0.0826	19.2
		(3)	0.92	0.15	150	4	0.0506	19.2

표(4) Parameters of basin representative IUH

BASIN	STATION	EVENT	CHANNEL NETWORK RESPONSE				HILL-SLOPE RESPONSE K _h	CHANNEL CONSTRAINT
			V ₀ (m/s)	F ₀ No	DIST-ANCE	BASE TIME		
Wi stream	Donggok	(2)	0.325	0.10	100	5	0.2115	1.007
		(4)	0.653	0.13	200	6	0.1957	1.024
	Gono	(1)(3)(4)	0.810	0.10	300	8	0.1909	1.014
		Miseung	(1)(3)(4)	0.780	0.22	300	10	0.1943
Bo-cheong stream	Yipyong	(1)(2)(3)	0.620	0.12	150	7	0.0790	0.994

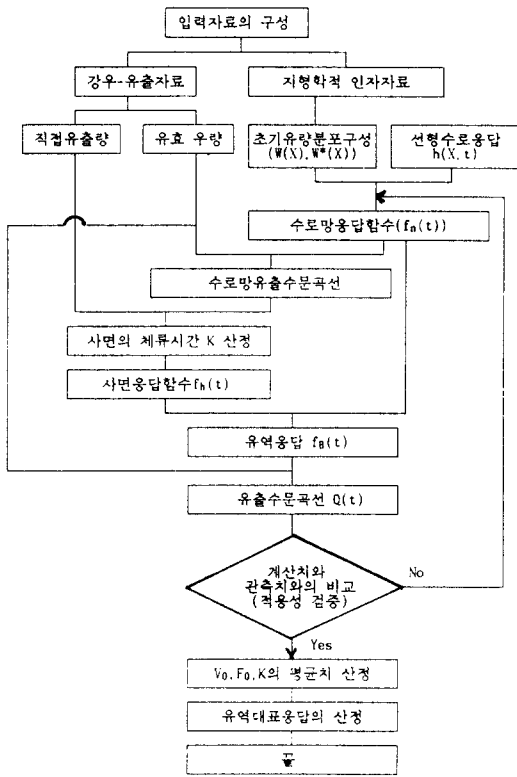


Fig. 2 Flow chart depicting basin IUH computation procedures

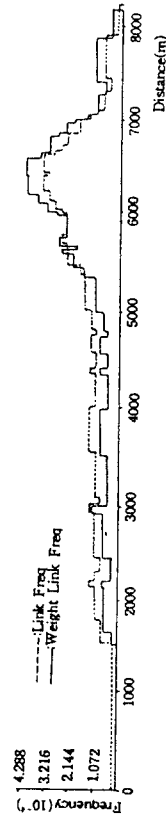


Fig. 3 Width function for Donggok station

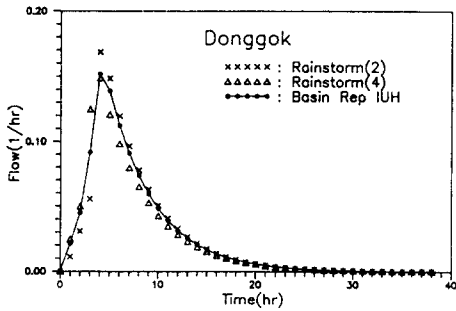


Fig. 4 Basin representative IUH of Donggok station

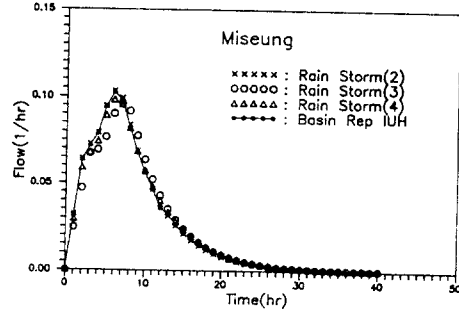


Fig. 6 Basin representative IUH of Miseung station

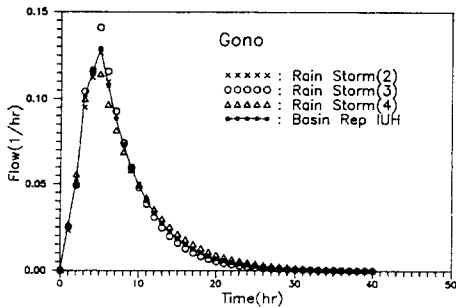


Fig. 5 Basin representative IUH of Gono station

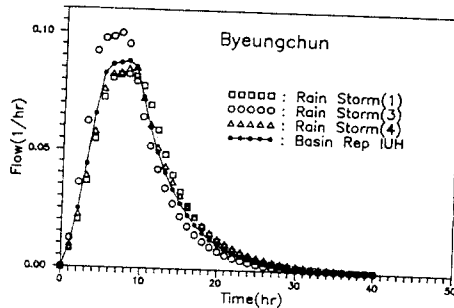


Fig. 7 Basin representative IUH of Byeungchun station

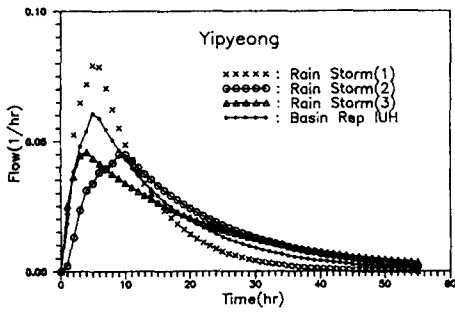


Fig.8 Basin representative IUH of Yipyong station

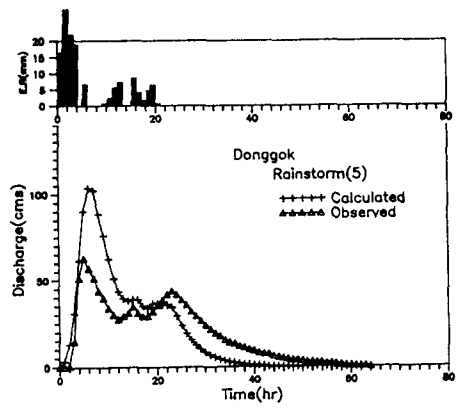


Fig.9 Comparison of calculated and observed hydrographs for Donggok Station (Rainstorm(5))

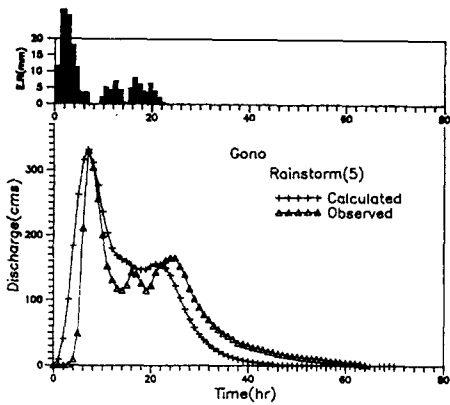


Fig.10 Comparison of calculated and observed hydrographs for Gono station (Rainstorm (5))

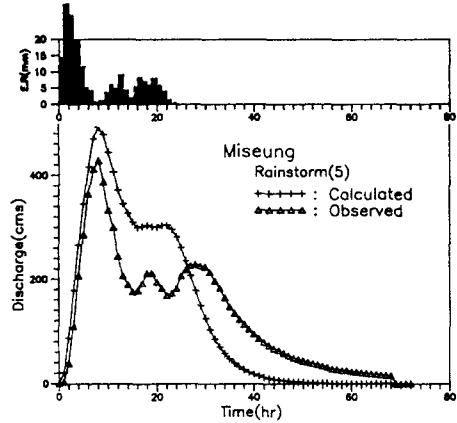


Fig.11 Comparison of calculated and observed hydrographs for Miseung station (Rainstorm(5))

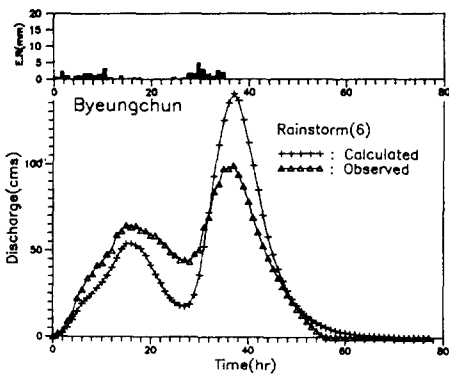


Fig.12 Comparison of calculated and observed hydrographs for Byeungchun station (Rainstorm(6))

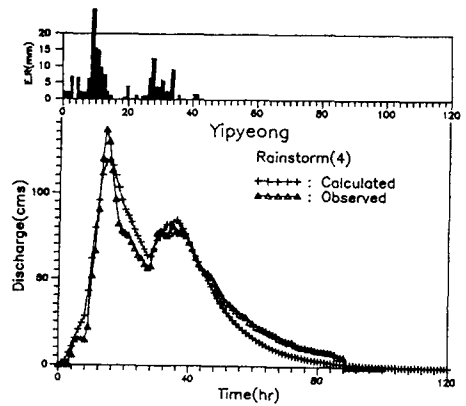


Fig.13 Comparison of calculated and observed hydrographs for Yipyong station (Rainstorm(4))