

국내 유역에 적합한 GcIUH 산정방안에 관한 연구

A Study on The Estimation of GcIUH for the River Basins of Korea

황보종구*, 이건행**, 김형수***, 윤광석****

Jong-ku Hwangbo, Keon Haeng Lee, Hung Soo Kim, Kwang Seok Yoon

요 지

국내에서는 빈약한 홍수량 자료로 인해 일반적으로 설계호우의 개념과 강우-유출해석을 통해 설계홍수량을 추정하여 이용하고 있다. 그러나 강수량 자료를 이용하여 강우-유출해석에 의해 유출량을 산정함으로써 설계홍수량을 추정하는 방법은 분석과정에서 불확실성이 높다는 문제점이 있다. 따라서 강우-유출해석의 정확성을 높이기 위해 설계자의 주관성을 배제한 객관적인 입력변수 추정방법이 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 강우-유출해석을 수행하는 대신 지형인자와 기후인자로만 단위유량도 유도가 가능한 GcIUH(지형기후학적 순간단위도)를 국내 유역에 적용하고자 한다. 이를 위해 국립국토지리원에서 제공하는 1:25,000 유역도에서 추출된 최고차 하천의 길이 L_{ω} 와 길이비 R_L 를 산정하였다. GIS와 유역도로부터 산정된 각각의 L_{ω} 와 R_L 를 이용하여 지점별 단위도를 각각 유도하고, 유도된 단위도로부터 유출수문곡선을 계산하였다. 실제 지형도에 의해 산정된 GcIUH와 유역면적, 유역평균경사별 첨두유량, 그리고 첨두시간의 상관성을 비교·검토한 결과, 유역평균경사별 첨두유량이 상관성이 높게 나타났으며, 첨두시간은 유역면적이나 유역평균경사에 상관없이 비교적 정확하게 실측치와 일치하였다. 본 연구에서는 유역평균경사별 첨두유량의 상관성을 분석하여 GcIUH의 보정계수인 a 를 도입하여, a 값을 유역평균경사별로 제시하였다.

핵심용어 : GcIUH, 강우-유출해석, 첨두시간, 첨두유량

1. 서 론

우리나라에서는 빈약한 홍수량 자료의 문제 때문에 일반적으로 설계호우의 개념과 강우-유출 해석을 통해 설계홍수량을 추정하고 있다. 설계홍수량추정에 사용하는 강우-유출 관계는 적용 유역의 크기에 따라 여러 가지로 분류할 수 있지만, 우리나라에서 사용되는 방법은 나끼야스(中安)의 종합단위도법, Clark 방법, Snyder 합성단위도법, 가지야마 공식, 합리식 등이 있다. 그러나 강우-유출해석에 의한 방법은 강수량 자료를 이용하여 비교적 간단히 유출량을 산정할 수 있는 편리함에도 불구하고, 분석과정에서의 불확실성이 매우 높으므로 그 결과에 항상 의문을 가질 수밖에 없는 중대한 문제점을 내포하고 있다.

Rodriguez-Iturbe 와 Gonzalez-Sanabria에 의해 1982년에 발표된 지형기후학적 순간단위도이론(Geomorphoclimatic Instantaneous Unit Hydro-graph, GcIUH)은 지형과 강우인자로 단위도를 정의함으로서 유역에서 지형자료와 기후학적 측면을 나타내는 강우자료를 가지고 단위도를 유도하였다. 그러나 GcIUH는 외국의 지형자료를 이용하여 유도된 단위도이므로 국내의 실정에 적합하지 않다고 판단된다. 따라서 신뢰성 있는 실측 강우-유출 자료가 있는 중소규모 유역에 대해 GcIUH를 유도하고, 유도한 GcIUH와 유역특성과의 관계를 규명함으로써 국내 수문특성에 적합한 GcIUH 단위도를 개발하는데 목적이 있다.

* 정회원. 한국건설기술연구원 유량조사사업단 연구원 · E-mail : hbjong9@kict.re.kr

** 정회원. 인하대학교 박사과정 · E-mail : ggun@inha.ac.kr

*** 정회원. 인하대학교 부교수 · E-mail : sookim@inha.ac.kr

**** 정회원. 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 · E-mail : ksyoon@kict.re.kr

2. GcIUH의 기본이론

Strahler의 차수법칙에 의하면 유역은 1차에서 n차까지의 하천을 포함하고 있다. 이들 각 하천의 수계망과 배수면적은 강우입자가 하강한 지점부터 출구까지 도달하는 경로를 결정짓는다. 예로서 사면에서의 유출을 r_i ($i=1, 2, 3, \dots, Q$), 하천에서의 유출을 C_i ($i=1, 2, 3, \dots, Q$)라 하면 3차 유역에 내린 강우입자는 아래와 같은 4가지 경로 S_i 중 하나를 따르게 된다.

$$\begin{aligned} path1 & S_1 : r_1 \rightarrow C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow C_3 \\ path2 & S_2 : r_1 \rightarrow C_1 \rightarrow C_3 \\ path3 & S_3 : r_2 \rightarrow C_2 \rightarrow C_3 \\ path4 & S_4 : r_3 \rightarrow C_3 \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)의 경우와 같이 유역내에 무작위로 하강하는 강우입자가 유역출구까지 도달하는 모든 가능한 경로의 조합을 S_f 라 할 때, S_f 의 총 경로수는 2^{Q-1} 과 같거나 작다.

하천유로 자체의 배수면적 크기를 무시하면, 유역내에 하강하는 입자가 임의 경로를 따를 확률은 각 경로의 최소하천차수 배수면적크기의 전 유역면적에 대한 비와 같다. 식 (1)에서와 같이 사면에서의 유출과 하천에서의 유출상태를 x_i ($i=1, 2, \dots, j; j < Q+1$), 임의 경로를 $S_i \in S_f$, $S_i = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ 여기서 $\{x_1, x_2, \dots, x_i\} \subseteq \{r_1, r_2, \dots, r_Q; C_1, C_2, \dots, C_Q\}$ 라 두면, 유효강우가 임의 경로 S_i 를 따를 확률은 식 (2)과 같다.

$$p(S_i) = \theta_i P_{x_1 x_2} \cdots P_{x_{j-1} x_j} \quad (2)$$

Rodriguez-Iturbe 등(1979)은 이를 분기비 (R_B)와 평균면적비 (R_A)로 표현되는 유역의 지형인자만의 함수로 나타내었다.

임의 경로 S_i 에서 강우입자가 지체하는 시간을 T_{si} , 각 경로를 구성하는 사면이나 하천상태에서 강우입자가 지체하는 시간을 T_{xi} 라 하면, T_{si} 는 식 (3)과 같이 임의 경로를 구성하는 각 상태에서 소비되는 시간의 합을 나타낸다.

$$T_{si} = \sum_{s1 \in si}^{sj} T_{xi} \quad j > 1 \quad (3)$$

따라서 전유역내에서 강우입자가 지체하는 시간 T_B 는 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_B = \sum_{s1 \in si} T_{si} \quad (4)$$

반면에, T_{xi} 의 확률밀도함수 $f_{xi}(t)$, 누가분포함수 $F_{xi}(t)$ 라 두면 유역내에 하강한 강우입자가 유역의 출구까지 도달하는데 지체한 누가밀도함수는 식 (5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P(T_B < t) &= \sum_{s1 \in si} P(T_{s1} < t) p(S_i) \\ &= \sum_{s1 \in si} [F_{x1}(t) * F_{x2}(t) * \dots * F_{xj}(t)] \cdot p(S_i) \end{aligned} \quad (5)$$

순간단위도는 정의에 의하여 식 (6)와 같이 나타낼 수 있으며, 이는 유역의 지형인자를 변수로 포함한 지형학적 순간단위도(GIUH)를 의미한다.

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{d P(T_B < t)}{dt} \\ &= \sum_{s1 \in si} [f_{x1}(t) * f_{x2}(t) * \dots * f_{xj}(t)] \cdot p(S_i) \end{aligned} \quad (6)$$

Rodriguex-Iturbe와 Gupta(1979)는 각 하천의 응답특성인 지체시간이 식 (7)과 같은 지수 분포를 보이는 것으로 가정하였다.

$$f_v(t) = \lambda_j \text{EXP}(-\lambda_j t) \quad (7)$$

3. 자료 구축

본 연구에서는 강우인자와 지형인자로 정의되는 GclIUH를 재정립하기 위하여 안정된 강우-유출자료가 있는 중소하천 7개 유역의 24개 지점에서 166개의 사상을 이용하였다. 사용된 수문자료의 현황은 표 1과 같다.

정확한 하천망을 추출하고 하천망의 차수를 계산하기 위해 ArcView3.2를 사용하였으며, 분석에 사용된 DEM은 30×30(m)격자로 이루어진 자료를 사용하였다. 본 연구에서는 국립지리원에서 제공하는 하천망도의 국가하천, 지방1급, 지방2급 하천망도를 사용하였다. 생성된 하천의 지형인자는 다음 표 2와 같이 나타났다. 표 2에서 하천폭, 하상경사, 조도계수는 각 수계의 하천정비기본계획을 참고하였다.

표 1. 수문자료 현황

하천	지점명	자료연도	총 사상수
삼교천	강청	1993~2003	3
	창소		3
	원평		6
	수촌		2
대화강	울산	1981~2006	6
만경강	대천	2004~2004	1
동진강	신태인	2002~2005	3
평창강	이목정	1983~2003	5
	장평		9
	백옥포		14
	상안미		10
	하반정		3
	방령		15
	동곡		11
위천	고노	1983~1997	7
	미성		7
	병천		9
	효령		10
	무성		10
보청천	산성	1983~2003	5
	이평		6
	단무		6
	기대		8
	산계		7

표 2. ArcView GIS에 의한 하천망의 지형특성인자

하천	지점명	유역면적 A(km ²)	분기비 R _b	길이비 R _L	면적비 R _a	최고차 하천길이 L _Ω (km)	하천폭 (m)	하상경사 (m/m)	조도계수
삼교천	강청	490.31	4.89	2.61	2.49	23.23	725.00	0.00047	0.026
	창소	426.33	3.33	1.87	1.86	16.07	291.66	0.00075	0.027
	원평	391.79	3.29	1.65	1.86	8.36	360.00	0.00078	0.030
	수촌	223.44	3.47	2.16	1.82	12.71	308.54	0.00114	0.026
대화강	울산	430.52	3.01	1.64	1.66	17.18	440.00	0.00091	0.030
만경강	대천	811.13	3.41	1.92	1.33	21.09	540.00	0.00185	0.025
동진강	신태인	226.94	6.40	3.46	3.62	22.79	250.00	0.00033	0.028
평창강	이목정	57.87	4.48	2.59	3.16	10.69	40.69	0.04166	0.030
	장평	105.20	5.50	3.21	3.67	19.37	40.70	0.02922	0.029
	백옥포	144.18	4.00	2.65	2.24	15.79	54.30	0.03044	0.027
	상안미	393.37	3.57	2.17	1.98	18.75	120.44	0.01842	0.025
	하반정	85.27	4.25	2.25	2.70	10.48	39.72	0.01315	0.028
	방령	528.44	3.82	2.40	2.08	26.43	127.26	0.01619	0.026
	동곡	46.72	4.07	2.30	2.39	6.41	90.00	0.04057	0.040
위천	고노	113.81	5.48	3.30	2.95	14.86	75.00	0.02084	0.040
	미성	171.86	6.78	4.64	4.43	27.30	180.00	0.01398	0.040
	병천	304.22	5.21	3.03	3.12	31.49	180.00	0.01099	0.040
	효령	148.40	4.31	2.59	2.68	15.87	101.73	0.03109	0.033
	무성	472.12	3.49	1.33	1.06	191.38	205.00	0.01078	0.033
보청천	산성	49.02	5.00	3.89	3.86	12.88	90.80	0.01615	0.026
	이평	76.79	3.38	1.83	2.13	5.85	113.70	0.01369	0.026
	단무	80.97	3.63	2.59	2.33	14.33	126.90	0.01234	0.027
	기대	36.35	3.81	1.97	1.99	6.36	70.55	0.00832	0.025
	산계	480.62	4.13	2.36	2.18	25.33	270.00	0.00582	0.024

4. 지형인자에 따른 첨두홍수량 및 첨두시간

지형인자를 이용하여 계산된 첨두홍수량 및 첨두시간과 실측된 첨두홍수량 및 첨두시간을 분석하였다. 7개 유역의 24개 지점에서 166개의 사상을 이용하여 실측 및 계산 첨두유량과 첨두시간을 다음 그림 1와 같이 나타내었다. 일반적으로 실측 첨두유량보다 계산된 첨두유량이 크게 나타났으며, 첨두시간은 몇몇의 값을 제외하고 실측과 계산값이 비교적 일치하는 것으로 나타났다.

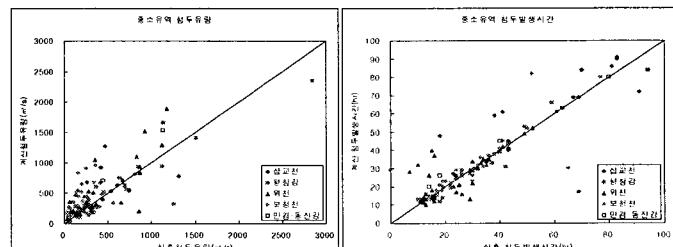


그림 1. 중소유역 첨두유량 및 첨두시간

계산된 첨두유량 및 첨두시간을 실측 첨두유량 및 첨두시간과 유역별, 유역면적별, 유역평균경사별로 분석하였다. 분석 결과 다음 그림 2~그림 5와 같이 유역평균경사별로 구분한 경우의 결정계수가 최소

$R^2=0.902$ 로 상당히 높게 나타났으며 이는 유역평균경사별로 GcIUH의 특성이 다르다는 것을 의미하며, 국내유역에 적합한 GcIUH 유도가 필요하다는 것을 나타낸다.

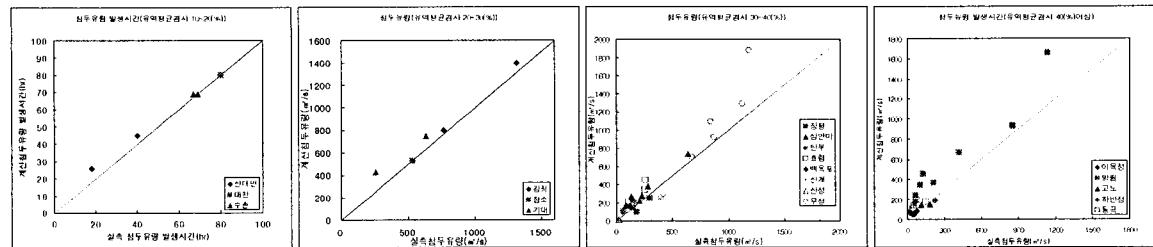


그림 2. 유역평균경사
10~20(%)의 첨두시간

그림 3. 유역평균경사
20~30(%)의 첨두유량

그림 4. 유역평균경사
30~40(%)의 첨두유량

그림 5. 유역평균경사
40(%)이상 첨두유량

5. 국내유역에 적용을 위한 GcIUH 보정

GIUH에서 다중회귀분석으로 산정된 계수와 지수를 국내에 그대로 적용하기에는 무리가 있다고 판단되어 상관성이 높은 유역평균경사별로 보정할 필요성이 있다고 판단된다. 따라서, GIUH의 계수 1.31을 a 로 치환하고 GIUH 식을 다시 정리하면 다음 식 (8)과 같다.

$$Q_p = 1.85a \frac{i_r A_{\Omega} t_r}{\Pi_i^{0.4}} \left(1 - \frac{0.166at_r}{\Pi_i^{0.4}} \right) \quad (8)$$

또한 단위유량도의 기저시간인 T_b 역시 GIUH의 첨두유량 q_p 의 함수이므로 다음 식 (9)와 같이 정리된다.

$$T_b = 2 / \left(\frac{0.665a}{\Pi_i^{0.4}} \right) \quad (9)$$

위의 식 (8)과 식 (9)를 이분법(Bi-Section method)으로 최적화 하여 유역평균경사별로 a 의 값을 산정하고, 산정된 a 를 이용하여 다음 표 3과 같이 수정된 GcIUH를 제시하였다.

표 3. a 의 결과값 및 보정식

유역평균경사	보정계수	Q_p 의 보정식	T_b 의 보정식
10~20(%)	1.00	$Q_p = 1.85 \frac{i_r A_{\Omega} t_r}{\Pi_i^{0.4}} \left(1 - \frac{0.166at_r}{\Pi_i^{0.4}} \right)$	$T_b = 2 / \left(\frac{0.665}{\Pi_i^{0.4}} \right)$
20~30(%)	1.21	$Q_p = 2.24 \frac{i_r A_{\Omega} t_r}{\Pi_i^{0.4}} \left(1 - \frac{0.201t_r}{\Pi_i^{0.4}} \right)$	$T_b = 2 / \left(\frac{0.805}{\Pi_i^{0.4}} \right)$
30~40(%)	0.98	$Q_p = 1.81 \frac{i_r A_{\Omega} t_r}{\Pi_i^{0.4}} \left(1 - \frac{0.163t_r}{\Pi_i^{0.4}} \right)$	$T_b = 2 / \left(\frac{0.652}{\Pi_i^{0.4}} \right)$
40(%) 이상	0.97	$Q_p = 1.79 \frac{i_r A_{\Omega} t_r}{\Pi_i^{0.4}} \left(1 - \frac{0.161t_r}{\Pi_i^{0.4}} \right)$	$T_b = 2 / \left(\frac{0.645}{\Pi_i^{0.4}} \right)$

6. 적용성 검증

새롭게 제시된 GcIUH는 선형 중첩의 원리에 의해 어떠한 호우 유형에도 적용될 수 있으므로 복잡한 호우를 사용한 검증은 단순호우를 사용한 결과와 비슷한 양상을 보여야 한다. 또한 유역평균경사별로 단위도

를 유도하였으므로 각 유역평균경사에 해당하는 유역에 대하여 검증을 하여야 한다. 따라서 유역평균경사가 10~20%의 범위에 속하는 수촌, 신태인지점, 20~30%에 속하는 기대지점, 30~40%인 동정교, 상도치교 지점, 40%이상인 석정교, 주천교지점에 각각의 단위도를 적용·검증하였다. 각 지점별로 계산된 지형인자는 다음 표 4와 같다.

표 4. 지점별 지형인자

하천명	지점명	유역면적 (km ²)	하천폭 (m)	길이비	최고차길이 (km)	하상경사 (m/m)	조도계수	유역평균경사 (%)
장계천	동정교	111.17	70.0	1.83	20.40	0.02714	0.033	33.59
장자천	석정교	88.70	72.0	2.78	29.37	0.01790	0.034	43.97
진안천	상도치교	33.01	180.0	1.85	5.88	0.01557	0.034	35.04
주자천	주천교	56.08	80.0	2.42	17.91	0.01519	0.034	43.30
狎교천	수촌	223.44	308.5	2.02	12.78	0.00114	0.026	15.40
보청천	기대	349.07	250.0	1.75	20.00	0.00832	0.025	20.40
동진강	신태인	226.94	250.0	1.99	14.67	0.00033	0.028	18.70

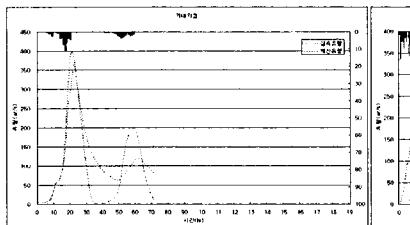


그림 6. 기대지점

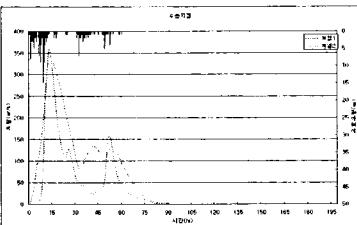


그림 7. 수촌지점

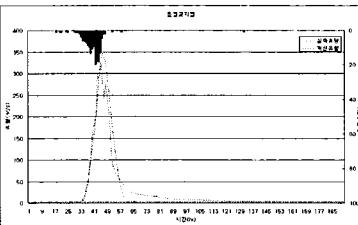


그림 8. 동정교지점

그림 9는 검증사상의 실측 및 계산 첨두유량을 비교하여 도시한 것으로 사상별로 차이는 있으나 상당히 실측과 계산치가 일치하는 것을 보여준다. 실측치와 계산치 첨두유량에서 가장 큰 차이를 보이는 사상은 동정교 지점의 사상이며 첨두유량이 약 20%의 차이를 보인다. 이는 고수위에서 수위-유량곡선의 외삽에 의한 영향이라고 판단되며, 수위-유량곡선의 외삽을 제외하면 첨두유량은 최소 2%에서 최대 12%의 차이를 보이고 있으며, 상도치교에서 실측과 계산된 수문곡선이 가장 유사한 것으로 나타났다. 그림 10에서처럼 검증사상의 첨두시간은 상당히 정확한 것으로 판단되며, 가장 큰 차이를 보이는 사상은 주천교의 한 사상으로 5시간의 차이를 보였다. 이를 제외한 나머지 사상의 실측 및 계산 첨두시간은 대부분 0~1시간정도 차이를 보이며 상당한 정확성이 있음을 확인할 수 있었다.

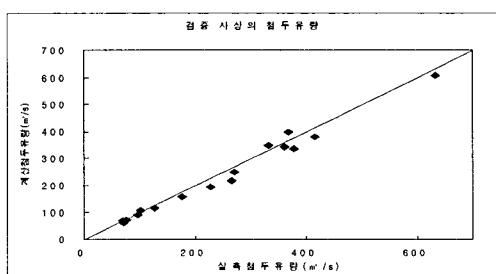


그림 9. 실측 및 계산 첨두유량

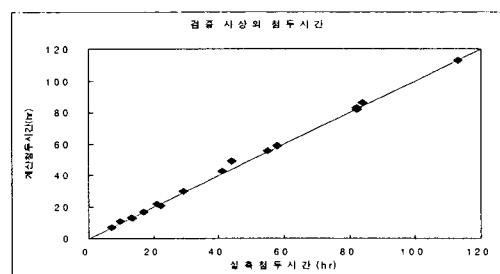


그림 10. 실측 및 계산 첨두시간

7. 결 론

본 연구에서는 신뢰할만한 실측 강우-유출 자료를 이용하여 국내 지형에 적합한 GCIUH를 유도하여 미계측 유역에 적용성을 검토하고자 하였다. 이를 위해 7개 유역의 24개 지점에 대하여 166개의 사상으로 국내 지형에 적합한 GCIUH를 유도하여 7개 지점의 16개 사상에 적용성을 검토하였다.

전술한 바와 같이 GIUH의 식에서 두 개의 유역에 대해 R_A, R_B, R_L 을 조합하여 다중회귀분석으로 산정된 계수와 지수는 국내 유역에 적합하다고 볼 수 없다. 따라서 실측첨두유량과 계산첨두유량을 비교하여 본 결과 유역평균경사별로 상관성이 있는 것으로 나타났다. 따라서 유역평균경사별로 실측첨두유량과 계산첨두유량을 비교하여 GIUH의 계수 a 를 산정하여 국내유역에 적합한 GcIUH를 유도하였다.

유도된 GcIUH를 7개 지점에 대해 적용성을 검토한 결과 국내유역에서 어느 정도 사용성이 있는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 김상단, 유철상, 윤용남(2000). 지형형태학적 순간단위도의 특성속도에 대한 고찰. 한국수자원학회지 제33권 제3호, pp.315 ~ 330.
- 박진성, 김형수, 안원식(2003). “하천의 프랙탈 차원 산정에 대한 비교 연구” 한국습지학회. 한국습지학회지.
- 정성원(2006). Clark 유역홍수추적모형의 매개변수 추정식 개발. 박사학위논문, 고려대학교.
- 황종훈(2005). GIUH 적용을 위한 Threshold Area와 특성속도의 산정. 석사학위논문, 인하대학교
- Ignacio Rodriguez-Iturbe, Juan B. Valdes(1979). "The Geomorphologic Structure of Hydrologic Response". *Water Resources Research*, Vol. 15 No. 6, pp. 1409 ~ 1420.
- Ignacio Rodriguez-Iturbe, Marcelo Gonzalez-Sanabria(1982). "A Geomorphoclimatic theory of the Instantaneous Unit Hydrograph", *Water Resources Research*, Vol. 18 No. 4, pp. 877 ~ 886.
- Ignacio Rodriguez-Iturbe, Marcelo Gonzalez-Sanabria, Gabriel Caamano(1982), "On the Climatic Dependence of the IUH : A Rainfall-Runoff Analysis of the Nash Model and the Geomorphoclimatic Theory", *Water Resources Research*, Vol. 18 No. 4, pp. 887 ~ 903.