

지형학적 순간단위유량도를 이용한 미계측 유역에서의 유출에 관한 연구

○박인찬* / 조원철**

1. 서론

지금까지 하천유역에서 강우에 의한 유출을 해석할 때에는 적용이 용이하고 비교적 정확한 결과를 얻는 것으로 알려진 단위도와 순간단위도를 널리 사용하여 왔으나, 이를 위해서는 신뢰성 있는 강우-유출자료의 획득이 선행되어야 한다. 미계측 유역에서 지형학적인자로 구성된 유역을 정량적으로 분석하여 유역의 지형학 및 수문학적 특성을 규명하고, 이를 기반으로 한 확률론적 모형의 개발이 대두됨에 따라 강우-유출의 수문학적 거동을 이해하고 매개변수의 공간적 변화성을 추정하는데 이용되고 있다. 즉, 유역의 동적특성과 하천 차수법칙을 고려하여 유도된 지형학적 순간 단위도는 지형학적 인자로 구성된 수문학적 응답모형으로서 미계측 중소 하천유역의 유출 해석을 가능하게 하고 실제 유역계에 더 근접한 물리적 과정을 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 국제수문개발계획 (International Hydrological Program : IHP) 유역인 낙동강 수계의 위천유역을 대상으로 강우-유출과정을 선형 수문계로 가정, Horton-Strahler의 하천 차수 법칙을 이용하여 배수유역의 지형학적 구조를 검토 분석하여, 지형학적 순간단위유량도 개념을 도입하여 Nash 모형의 매개변수를 산정하므로써, 미계측 유역에서도 적용할 수 있는 유출모형을 확립하는데 그 목적이 있다.

2. 연구방법

2.1 하천차수의 지형학적 법칙

유역의 강우에 대한 유출현상은 지형 및 수문학적 인자에 의해 다양한 응답특성을 나타내며, 수로망과 하천 유역상 지표면 흐름 영역은 Strahler의 차수 구성에 따라 정리되어질 때 Horton의 경험적 지형학적 법칙을 만족하게 된다. Horton 법칙의 정량적 표현은 아래와 같다.

하천의 최고 차수를 Ω , i 차 하천의 하천 수를 N_i 라고 하고, \bar{L}_i 를 i 차 수로의 평균길이, \bar{A}_i 는 i 차로 유입되는 $i-1$ 차의 수로면적을 포함한 i 차 평균 배수면적이라면, Horton의 분기비 (R_B), 길이비 (R_L), 그리고 면적비 (R_A)는 식 (1) ~ 식 (3)와 같다.

$$R_B = N_{i-1}/N_i, \quad i = 2, 3, \dots, \Omega \quad (1)$$

$$R_L = \bar{L}_i/\bar{L}_{i-1}, \quad i = 2, 3, \dots, \Omega \quad (2)$$

$$R_A = \bar{A}_i/\bar{A}_{i-1}, \quad i = 2, 3, \dots, \Omega \quad (3)$$

2.2 지형학적 순간단위도 이론

Rodriguez-Iturbe와 Valdes (1979)는 GIUH를 3차 하천에 적용시켜, 지형법칙과 동적 인자가 고려된 GIUH의 주된 인자인 침투유량과 침투유량 도달시간에 대한 확률밀도함수를 유도하였다.

$$q_p = \theta \cdot v \quad (4)$$

$$t_p = \frac{k}{v} \quad (5)$$

여기서 θ 와 k 는 \bar{L}_1 과 Ω , 그리고 R_A , R_B , R_L 의 함수이다. 즉,

* 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정

** 연세대학교 공과대학 사회환경·건축공학부 교수

$$\theta = \left(\frac{1.31}{L_1}\right) \cdot R_L^{-1.57} \quad (6)$$

$$k = 0.44 \cdot \overline{L_1} \cdot R_B^{0.55} \cdot R_A^{-0.55} \cdot R_L^{-1.62} \quad (7)$$

이와 같은 절차에 의해서, Rodriguez-Iturbe와 Valdes (1979)는 임의 하천 차수에 일반적으로 적용 가능하도록 식 (6)과 (7)의 지수 변화를 통해 q_p , t_p 의 확률밀도함수를 구하였으며, Rosso (1984)는 식 (8)와 (9)의 형태로 이를 재정리하였다.

$$q_p = \frac{0.364}{L_\Omega} \cdot v \cdot R_L^{0.43} \quad (8)$$

$$t_p = 1.584 \cdot \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0.55} \cdot R_L^{-0.38} \cdot \frac{L_\Omega}{v} \quad (9)$$

2.3 지형학적 순간단위도를 이용한 Nash 모형의 매개변수 추정

유역전반에 걸쳐 순간적으로 내린 단위유효우량을 n 개의 저수지를 통해 선형 추적하여 유도한 Nash 모형의 순간단위유량도는 식 (10)과 같이 표현되며, 매개변수 n 과 K 를 갖는 Gamma분포와 같다. 즉,

$$U(0, t) = \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{\Gamma(n)} \cdot e^{-\left(\frac{t}{K}\right)} \cdot \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} \quad (10)$$

$$\frac{(n-1)}{\Gamma(n)} \cdot e^{-(n-1)} \cdot (n-1)^{n-1} = 0.5764 \cdot R_B^{0.55} \cdot R_A^{-0.55} \cdot R_L^{0.05} \quad (11)$$

$$K = \frac{t_p}{n-1} = \frac{0.44}{v} \cdot L_\omega \cdot R_B^{0.55} \cdot R_A^{-0.55} \cdot R_L^{-0.38} \cdot \frac{1}{n-1} \quad (12)$$

식 (11)로부터, 저수지 상수 n 은 유역에 대해서 일정하고, 속도와는 무관한 것으로 나타난다. 그러나, 저류계수 K 는 식 (12)에서처럼 속도 v 에 반비례 관계에 있는 것을 확인할 수 있다.

2.4 지형기후학적 특성속도

Rodriguez-Iturbe 등 (1982)은 강우강도 i_r 과 강우지속시간 t_r 의 분포는 기후특성에 따른 무작위 변수이기 때문에 순간단위도를 통계학적 단위 충격 함수로 나타내고자 하였다. 즉, 지형기후학적 순간단위도 (Geomorphoclimatic IUH : GcIUH)의 침투유량 q_p 와 도달시간 t_p 는 유역의 지형인자와 기후특성인자인 i_r , t_r 분포의 영향을 받는 무작위 변수가 된다고 설명하였다. 하천 유로의 유출속도를 일정하다고 가정할 때, Pilgrim (1977)은 유출속도 v 를 식 (13)과 같다고 하였다.

$$v_1 = \alpha_1^{1/ms} \cdot Q^{(ms-1)/ms} = \alpha_\Omega^{1/ms} \cdot Q_\Omega^{(ms-1)/ms} = v_\Omega \quad (13)$$

여기서 Q_1 , Q_Ω 는 1차 및 Ω 차 유역의 침투유량, α_1 , α_Ω 는 1차 및 Ω 차 유역에서의 운동과 계수이다. 유역내의 유효우량을 i_r 라고 하면, 침투유속 v 는 다음의 식 (14)와 같다.

$$v = 0.665 a_\Omega^{0.6} (i_r A_\Omega)^{0.4} \quad (14)$$

여기서 $a_\Omega = \frac{s^{1/2}}{nb_\Omega^{2/3}}$, s 는 평균유역경사, n 는 조도계수이고, b_Ω 는 최고차 수로 폭이다.

3. 자료분석

3.1 대상유역

경상북도 군위군에 있는 낙동강 위천 대표유역은 낙동강 중류부 좌안에 위치하고 있으며, 유역면적은 472.53 km²로서 위천 유역면적 (약 1,409 km²)의 약 33 %를 차지하고 있다. 대표유역은 6개의 소유역-동곡, 고노, 미성, 병천, 무성, 효령-으로 나뉘어져 있다.

3.3 대상구역의 지형형태학적 변수 추정

대상 구역의 하상 지형인자는 자료의 신뢰성을 높이기 위하여 1989년 IHP 보고서에 수록된 내용을 참고하였으며, 1:50,000 지형도상에서의 지형형태학적 인자는 표 1과 같다.

표 1. 대상 구역의 지형형태학적 특성

지형인자 구역	면적(km ²)	유역경사	유로경사	R _B	R _L	R _A	L _Q
동곡	33.63	0.452	0.0406	3.047	1.613	3.884	3.090
고노	109.73	0.437	0.0208	4.153	2.535	4.989	13.990
미성	171.25	0.341	0.0140	4.05	1.27	4.67	30.90
병천	302.13	0.306	0.0110	4.46	2.07	5.17	40.65
무성	472.53	0.325	0.0108	4.88	2.18	4.72	42.83
효령	151.05	0.388	0.0311	5.335	2.668	6.410	12.466

3.4 대상구역에 대한 Nash모형의 매개변수 산정

Boyd (1978)는 Nash 매개변수 n 이 유역 전반에 걸쳐서 강우 사상에 관계없이 일정한 값을 갖는다고 하였으나, 본 연구에서는 지형학적 순간단위유량도의 적용성 검토를 위해 하나의 강우 사상 별로 약간의 변화를 보이며 유도되어졌다. 본 연구에서의 n 과 K 는 모두 수평직선 분리법을 이용하여 직접유출수문곡선을 산정한 후 $M_1 = nK$ 과 $M_2 = n(n+1)K^2$ 의 관계에 따라 원점에 대한 유효우량 주상도의 1, 2차 모멘트와 직접유출 수문곡선의 1, 2차 모멘트에 의해서 얻어지게 된다.

3.5 지형학적 순간단위도를 이용한 Nash 모형의 매개변수 산정

표 2는 GIUH에 의한 Nash 모형의 n 과 K 을 보이고 있으며, 모멘트 법에 의한 Nash 모형과는 다소 차이를 보이고 있지만 n 은 소유역 별로 일정한 값을 보이고, K 는 유역 내 유효강우와 동적 특성에 따라서 차이를 보이고 있다. 이는 식 (12)과 식 (14)에서 볼 수 있듯이 K 는 지형의 동적 특성을 반영하는 특성속도의 변화에 선형적인 관계가 있으나, 유역내의 특성속도는 유역의 복잡한 물리적인 요소와 강우강도에 대단히 민감하게 반응을 하고 있기 때문이다.

표 2. GIUH 방법에 의한 Nash 모형 매개변수

강우사상	n	K
DK970624	2.954	2.94, 1.77, 4.62, 3.90, 4.54, 4.77, 4.13, 4.77, 4.77, 6.00, 5.82, 6.00, 6.95, 7.68, 9.61, 10.78, 7.28, 7.28, 8.79, 7.28, 10.78, 1.96
GN970715	3.032	9.21, 7.39, 7.07, 2.43, 3.17, 3.37, 6.33, 6.14, 7.16, 7.74, 10.55
HR940828	3.042	3.91, 2.63, 16.05
MS970705	2.988	3.53, 5.95, 8.64, 2.29, 1.62, 2.39, 9.40, 4.11, 3.72, 6.69, 4.75, 3.12, 5.85, 4.69, 1.60, 5.31, 3.39, 5.39
BC970512	3.069	2.19, 2.03, 2.53, 1.80, 1.83, 1.51, 2.69, 3.67, 6.05
MU970705	3.504	4.36, 1.96, 2.56, 2.40, 1.34, 1.01, 1.29, 2.52, 3.40, 2.06, 30.87, 2.68, 5.22, 3.62, 5.22, 5.90, 2.48, 2.29, 2.39, 2.42, 1.01, 2.15, 2.39, 4.69, 2.14, 2.69

3.6 모형의 적합성

GIUH를 이용한 Nash 모형의 매개변수 n 과 K 에 의해서 얻어지는 순간단위도는 식 (15) - (17)을 이용하여 $m_2 : m_3$ 평면상에서 적합성이 판단된다.

$$m_2 = \frac{\int U(0, t) \cdot (t - U_1)^2 dt}{U_1^2} \quad (15)$$

$$m_3 = \frac{\int U(0, t) \cdot (t - U_1)^3 dt}{U_1^3} \quad (16)$$

$$U_1 = m_1 = \int U(0, t) \cdot t \cdot dt \quad (17)$$

여기서 U_1 은 원점에 대한 순간단위도의 1차 모멘트이고, Nash 모형과 지형학적 순간단위 유량도에 의해서 결정되어지는 모멘트 m_2 와 m_3 값은 그림 1의 $m_3 = 2m_2^2$ 와 $m_3 = 2m_2^{3/2}$ 의 범위와 비교되어진다.

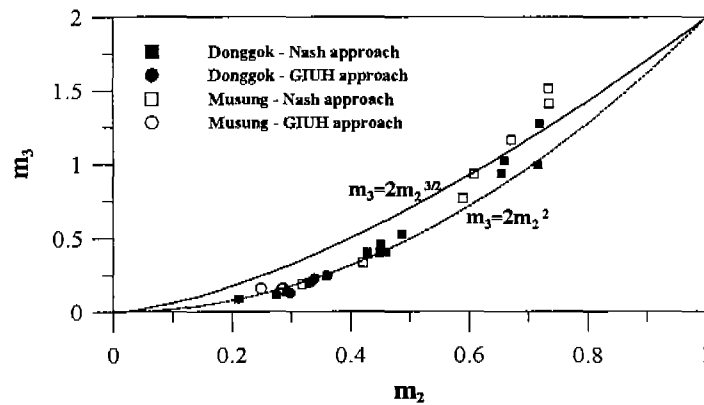
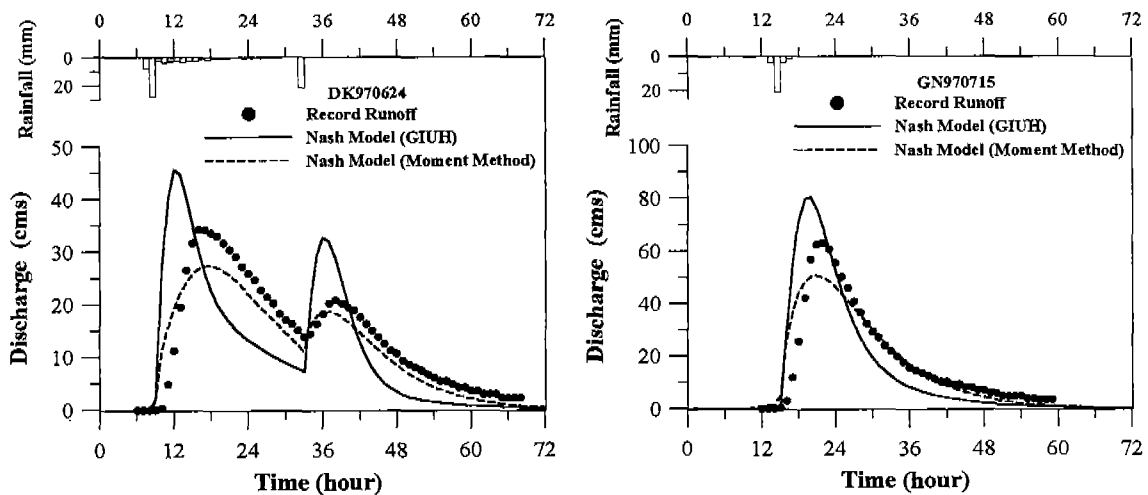


그림 1. 동곡유역과 무성유역의 m_2 ; m_3 평면에 의한 모형의 적합성

4. 비교고찰

4.1 비교분석

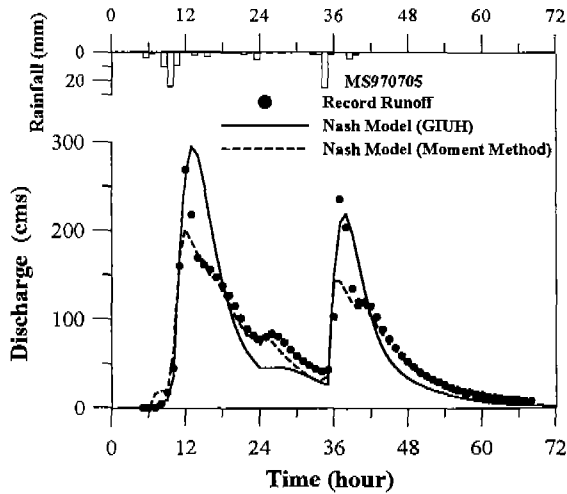
본 연구에서 확립된 모형과 기존의 모멘트 법에 의한 Nash 모형에 의한 각 소유역 별 강우사상에 대해 도시한 결과를 보이고 있다. 모든 강우사상에 대해서 직접유출 수문곡선의 산정에는 수평 직선분리법, 유효우량 산정에는 ϕ -지수법을 사용하였으며, 사상에 따라 모의한 결과는 그림 2(a) ~ 2(d)와 같다.



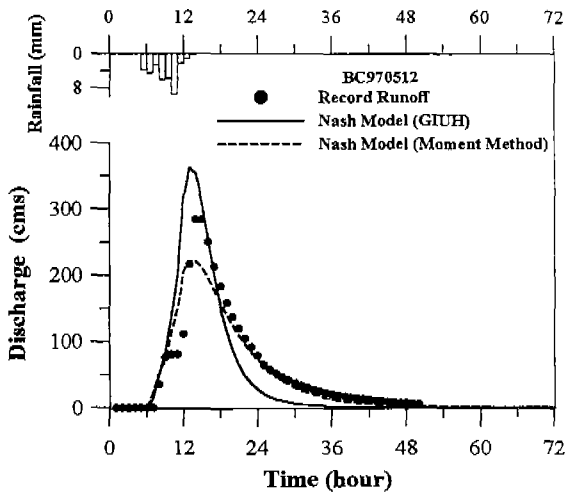
(a) 동곡 97년 6월 24일 강우사상

(b) 고노 97년 7월 15일 강우사상

그림 2. GIUH에 의한 Nash 모형의 직접유출 수문곡선 모의



(c) 미성 97년 7월 5일 강우사상



(d) 병천 97년 5월 12일 강우사상

그림 2. GIUH에 의한 Nash 모형의 직접유출 수문곡선 모의 (계속)

그림 3와 그림 4는 관측치, 모멘트법에 의한 Nash 모형, 그리고 지형학적 순간단위도에 의한 Nash 모형으로 산정된 매개변수에 대한 직접 유출 수문곡선에서의 첨두유량 도달시간과 첨두유출량을 비교한 결과이다. 그림에서 나타나는 것과 같이 모멘트법에 의한 Nash 모형은 대부분의 강우 사상에 대해 관측치와 비교해 첨두유량 도달시간과 첨두유출량을 비교적 과소 예측하는 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있고, GIUH에 의한 Nash 매개변수의 산정 시에는 첨두유량 도달시간이 과소 예측, 첨두유량은 전반적으로 과다하게 예측하는 경향이 있음을 알 수가 있다.

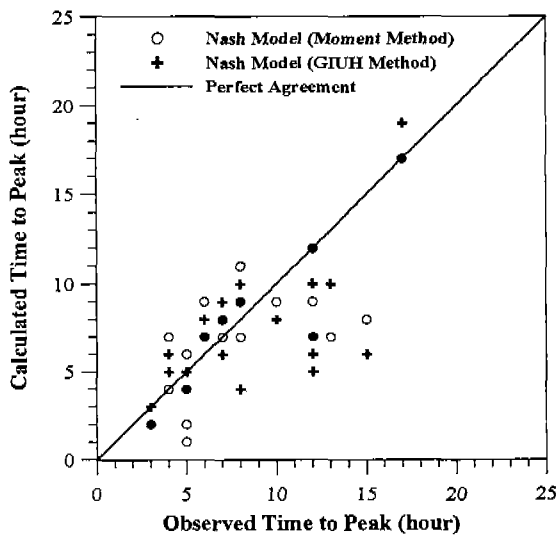


그림 3. 관측된 첨두유량과 계산된 첨두유량의 비교

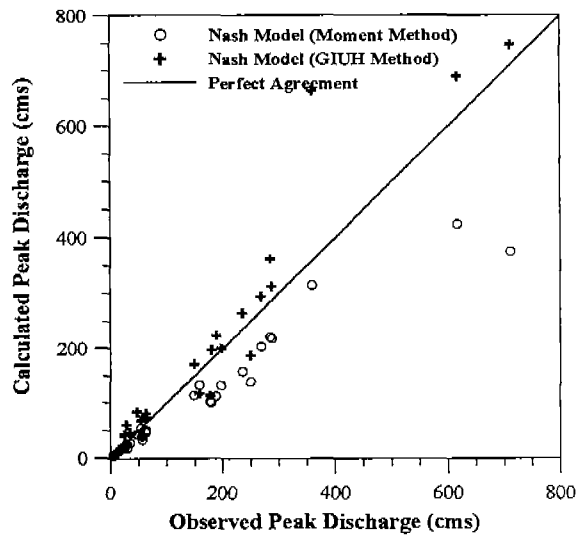


그림 4. 관측된 첨두유량 도달시간과 계산된 첨두유량 도달시간의 비교

4.3 미계측 유역의 유역응답

GIUH에 의한 Nash 모형의 매개변수를 유도하는 방법을 이용하여 미계측유역의 순간단위유량도를 유도하기 위해 필요한 미지수는 유효강우강도, 특성속도, 유역의 지형학적 인자인 길이비, 면적비, 분기비 등이 있고, 이를 바탕으로 한 회귀식에 의해서 선형저수지수(형상계수), n 과 저류상

수, K 가 얻어지게 되면 직접유출 수문곡선의 형태를 얻을 수 있다.

Boyd (1978)는 Nash 모형의 매개변수와 유역특성인자의 회귀분석을 통해 n 값은 유역에 따라 크게 변하지 않을 뿐 아니라 유역특성인자와의 관계가 약한 반면, K 값과 유역규모에 따라 일정한 성향으로 증가하는 변동성이 있음을 밝힌 바 있다. 이와 같은 경향은 본 연구에서의 비교 분석에서도 잘 알 수가 있었고, 저류계수 K 의 산정시 지형학적 인자의 세심한 선정이 요구되어지고 이것은 미계측 유역의 수문학적 거동을 파악하기 위해서는 필수적이라 할 수 있다.

GIUH에 의한 Nash 모형의 특성은 표 4에 제시한 결과에서 확인할 수 있으며, 유역에 따라 일정한 Nash의 n 값을 이용하면 미계측 유역에서의 GIUH를 이용한 Nash 모형의 순간단위도를 쉽게 얻을 수 있고 유역의 직접유출 수문곡선의 도출이 용이해질 것이다. 비록 GIUH의 주요특성인 침투유량과 침투유량 도달시간의 함수를 결정하기 위해서는 다양한 지형학적 인자비에 의한 회귀 분석 식을 유도해야 하는 과정이 필요하지만 미계측 유역에서의 침투유량 도달시간과 침투유량의 예측에 있어서는 비교적 양호한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 GIUH 개념을 도입하여 Nash 모형의 매개변수를 산정함으로써, 미계측 유역에서도 적용할 수 있는 유출모형을 확립하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 확립된 모형의 적용성을 검토하기 위하여 위천유역을 대상유역으로 선정하고 유역 내 6개 소 유역의 다양한 강우 사상에 대하여 유출수문곡선을 산정한 결과 단일 강우사상과 복합 강우사상 모두 양호한 결과를 나타내었다.

2. 지형학적 인자를 이용한 Nash 모형의 결과를 실측치 및 모멘트 법에 의한 Nash 모형과 비교한 결과 침투유량과 침투유량 도달시간 산정에서 다소의 오차를 보였으나 미계측 유역에서의 적용이라는 점을 고려할 때 적용성이 높은 것으로 판단된다.

3. 지형학적 인자를 이용한 Nash 모형의 매개변수들은 Nash에 의해 제시된 무차원 평면 범위 내에 위치하고 있음을 확인할 수 있다. 그러므로 본 모형의 매개변수에 따른 유출량 산정은 Nash 모형의 매개변수에 의한 것과 상당히 근사한 값을 나타냄을 알 수 있다.

4. Nash 모형의 형상계수, n 값은 강우사상에 따라 변하게되므로 유역 대표 값을 선정하기 위해서는 산정된 n 값에 따라 보정이 필요하다. 그러나 본 연구에서 적용된 지형학적 인자를 이용한 Nash 모형의 n 값은 소유역의 다양한 강우사상에 관계없이 일정하기 때문에 n 값의 보정으로 인한 오차는 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

- 건설교통부 (1987~1998). *국제수문개발계획 (IHP) 대표시험유역 연구조사 보고서*
- Bhaskar, N.R., Parkda, B.P., and Nayak, A.K. (1997). "Flood estimation for ungauged catchments using the GIUH." *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, Vol. 123, No. 4, pp. 228-238.
- Boyd, M.J. (1978). "A storage-routing relating drainage basin hydrology and geomorphology." *Water Resources Research*, Vol. 14, Mo. 5, pp. 921-928.
- Pilgrim, D.H. (1977). "Isochromes travel time and distribution flood storage from a tracer study on a small watershed." *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 3, pp. 587-595.
- Rodriguez-Iturbe, I., and Valdes, J.B. (1979). "The geomorphologic structure of hydrologic response." *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1409-1420.
- Rodriguez-Iturbe, I., Gonzalez-Sanabria, M., and Caamano, G. (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
- Rosso, R. (1984). "Nash model relation to Horton order ratios." *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 7, pp. 914-920.