

농업수리구조물의 적정설계홍수량 유도를 위한 유출수문곡선모형의 개발(I)

Development of Runoff Hydrograph Model for the Derivation of Optimal Design Flood of Agricultural Hydraulic Structures(1)

이 순 혁* · 박 명 근** · 맹 승 진***
Lee, soon Hyuk · Park, Myeong Keun · Maeng, Sung Jin

Summary

It is experienced fact as a regular annual event that the structure to be designed on unreasonable flood for the agricultural structures including reservoirs have been brought not only loss of lives, but also enormous property damage. For the solution of this problem at issue, this study was conducted to develop an optimal runoff hydrograph model by comparison of the peak flows and time to peak between observed and simulated flows derived by linear time-invariant and linear time-variant models under the condition of having a short duration of heavy rainfall with uniform rainfall intensity at nine small watersheds which are within the range of 55.9 to 140.7 square kilometers in area in Han, Geum, Nagdong and Yeongsan Rivers.

The results obtained through this study can be summarized as follows.

1. Storage constants and Gamma function arguments were calculated within the range of 1.2 to 6.42 and of 1.28 to 8.05 respectively by the moment method as the parameters for the analysis of runoff hydrograph based on linear time-invariant model.

2. Parameters for both linear time-invariant and linear time-variant models were calibrated with nine gaged watershed data, using a trial and error method. The resulting parameters including Gamma function argument, N and storage constant, K for linear time-invariant model were related statistically to watershed characteristic variables such as area, slope, length of main stream and the centroid length of the basin.

3. Average relative errors of the simulated peak discharge of calibrated runoff hydrographs by using linear time-variant and linear time-invariant models were shown to be 0.75 and 5.42 percent respectively to the peak of observed runoff hydrographs. Correlation coefficients for the statistical analysis in the same condition were shown to be

* 충북대학교 농과대학

** 충북대학교 농업과학연구소

*** 충북대학교 대학원

키워드 : 선형시변유출수문곡선모형, 선형불시변 유출수문곡선모형, 저류상수, 감마함수, 매개변수보정, 첨두유량, Runge-Kutta 수치해석, 첨두유량도달시간

0.999 and 0.978 with a high significance respectively. Therefore, it can be concluded that the accuracy of a linear time-variant model is approaching more closely to the observed runoff hydrograph than that of a linear time-invariant model in the applied watersheds.

4. Average relative errors of the time to peak of calibrated runoff hydrographs by using linear time-variant and linear time-invariant models were shown to be 16.44 and 19.89 percent respectively to the time to peak of observed runoff hydrographs. Correlation coefficients in the same condition were also shown to be 0.999 and 0.886 with a high significance respectively.

5. It can be seen that the shape of simulated hydrograph based on a linear time-variant model is getting closer to the observed runoff hydrograph than that of a linear time-invariant model in the applied watersheds.

6. Two different models were verified with different rainfall-runoff events from data for the calibration by relative error and correlation analysis. Consequently, it can be generally concluded that verification results for the peak discharge and time to peak of simulated runoff hydrographs were in good agreement with those of calibrated runoff hydrographs.

I. 서 론

우리나라는 국토의 68%가 산지인데다가 지세가 급준하고 상류수원지대의 임상상태의 불량으로 단시간 집중호우 일시에는 홍수도달시간이 매우 짧아 큰 홍수가 발생할 위험성이 매우 높다. 또한 3면이 바다로 둘러싸인 기상여건으로 말미암아 대륙성기후와 해양성기후의 교차현상을 빚어 6, 7, 8월에 태풍동반의 집중호우를 유발하므로서 막대한 인명과 재산상의 피해가 연례행사처럼 나타나고 있음은 주지의 사실이다.

이러한 홍수로 부터 유발되는 각종 농업수리구조물의 파괴에 의한 위험도를 제거하고 안정성 있는 농업용수공급을 위해서는 보다 정확한 홍수유출수문곡선모형의 개발에 의한 적정설계홍수량의 제시가 우선적으로 해결해야 할 중차대한 과제임에 틀림없다.^{4), 10), 11)}

특히 근년 우리나라의 발전하는 경제개발과 문명의 발달로 생활 및 공업용수는 물론 농업의 근대화를 위한 농업용수의 급증하는 수요에 대처해야만 하는 긴급한 전환점에 처해 있음은 주지의 사실이며 더우기 UR 농산물협상

타결로 인한 농산물시장의 개방압력은 우리나라 농촌경제의 꺾박을 가중시키고 있어 현재의 농업여건은 과거 어느때 보다도 더욱더 어려운 입장에 처해있다. 이와같은 농촌경제의 난관을 극복하기 위해 정부에서는 신농정의 일환으로서 농업구조개선사업에 역점을 두고 있으며 이 사업의 일환으로서 농업생산성제고를 위한 농업용수원 확대개발이 우선적으로 계획되고 있다. 이를 위해서는 전술한 바와 같이 보다 합리적이고 안정성 있는 농업수리구조물의 설계를 위한 적정한 설계유출수문곡선모형이 필수적이나 우리나라는 아직도 이의 모형정립이 되어있지 못한 실정이다.

이에, 본 연구에서는 저수지를 위시한 농업수리구조물의 설계홍수량 유도에 적용하는 유역면적이 작고 짧은 호우에 균일한 강우강도를 갖는 호우사상만을 대상으로 하므로서 보다 정확한 홍수유출수문곡선모형을 개발하여 이의 적용성을 분석 검토하고자 한다. 따라서 본 연구의 제1보에서는 선형불시변수문모형(線形1時變水文模型)과 선형시변수문모형(線形時變水文模型)의 2개 모형설정과 함께 이들의 이론적 고찰, 수문모형별 개발, 모형별

매개변수의 유도, 모형별 보정과 검증에 의한 침투홍수량과 침투홍수도달시간의 비교 분석을 수행하고 제2보에서는 비선형불시변수문모형 및 비선형시변수문모형의 개발과 비교 분석으로 적정수문곡선모형을 유도하므로써 홍수와 가뭄의 피해를 동시에 막을 수 있는 농업용수원의 설계홍수량과 설계배수량등의 신빙성있는 설계지침을 제공하고자 한다.

II. 선형불시변 및 선형시변유출수문곡선모형의 이론적 분석 및 모형의 개발

1. 선형불시변 및 선형시변 유출수문곡선모형의 이론적 고찰

가. 선형 및 비선형저수지 이론

선형단위유량곡선의 개념은 중첩원리(Principle of Superposition)와 불시변원리(Principle of Time-Invariance)의 개념적 가정을 기초로하여 해석한 것이다. 이러한 가정을 기초로하여 자연계 집수구의 수문체계는 하나의 총괄체계(Lumped System)로 볼수 있다. V. T. Chow⁴⁾는 한 집수구의 수문계는 저류량을 S라 하고 유출량을 Q라 할때 다음의 식(1)과 같은 직접적인 선형함수를 이룬다고 제창하였다.

$$S = KQ \dots\dots\dots (1)$$

즉 선형개념적 저수지를 의미한다. 식(1)에서 K는 저류상수로서 시간차원인 [T]로 나타낸다. 실제적인 자연조건하에 있어서는 집수구의 총저수량을 하천저수량, 지표하저수량 및 지표면저수량 등이 포함 될수 있다. 총저류량과 유출량과의 관계를 선형으로 가정한다면 저류상수와 유출량간에도 반드시 선형관계를 나타낸다. 그렇지 않으면 집수구계는 곧 하나의 비선형계가 된다. Prasad²⁰⁾는 저류량

과 유출량과의 관계를 다음과 같이 제시하였다.

$$S = KQ^N \dots\dots\dots (2)$$

식(2)에서 N은 시험함수로서 N=1 일때는 선형저수지계로 보지만 N≠1 혹은 N)0 일때는 비선형저수지계가 된다. 1967년에 Prasad는 식(2)를 다음과 같이 수정 제시하였다.

$$S = K_1Q^N + K_2 \frac{dQ}{dt} \dots\dots\dots (3)$$

여기에서 K₂는 저류-유출관계를 고려한 계수이다.

나. 불시변과 시변성의 개념

한 집수구의 수문계가 불시변이라고 하는것은 집수구에 있어서 종합적인 물리적 특성이 나타내는 직접유출에 관계되는 계수가 시간변화와는 아무런 관계가 없다는 것이다. 그러나 실제적으로 자연의 수문현상은 복잡적으로 변화하기 때문에 결과적으로 추계학적 특성(Stochasticity)을 갖게 된다는 사실이다. 따라서 수문계의 시간적 변화와 불확정성을 고려하여 Chieu와 Bittler⁵⁾는 시변성의 선형모형을 다음과 같이 제안 하였다.

$$S(t) = K(t) \cdot Q(t) \dots\dots\dots (4)$$

여기에서 S, K 및 Q는 모두 시간의 함수로서 시시각각 다르게 된다. 실제적으로 자연계의 수문과정은 비선형, 시변성의 특성에 부합될수 있다고 볼수 있다. Chieu⁶⁾ 등은 유출수문곡선 상승부를 고려하여 저류량과 유출량의 관계를 다음의 식(5)와 같이 나타내었다.

$$S(t) = K_1Q(t)^{N_1} + K_2(t) \left(\frac{dQ(t)}{dt} \right)^{N_2} \dots (5)$$

여기에서 N_1 , K_1 및 N_2 는 상수이며 $K_2(t)$ 는 호우계속시간과 관련된 함수이다.

이상의 이론적 고찰을 종합해 보면 식(1), (2) 및 (3)은 모두 불시변모형을 나타내고 식(4) 및 식(5)는 시변성모형이 되며 식(1) 및 식(4)는 선형모형을 나타낸다. 그리고 식(2), (3) 및 식(5)는 비선형모형이 된다.

다. 선형불시변 유출수문곡선모형

한 집수구의 수문과정은 다음의 수문방정식으로 표시할수 있다.

$$I(t) - Q(t) = \frac{dS(t)}{dt} \dots\dots\dots (6)$$

여기에서 $I(t)$ 는 유입인자, $Q(t)$ 는 유출인자이며 $dS(t)/dt$ 는 단위시간당 집수구저류량의 변화율이다. 1957년에서 1960년에 걸쳐 Nash^{17, 18)}는 일련의 저류상수를 K 로하는 N 개의 선형개념의 저수지가 있다고 가정하여 선형불시변의 순간단위도 수문곡선을 다음과 같은 식으로 이끌어 내었다.

$$Q_E = \left[\frac{Ae^{-t/K}(t/K)^{N-1}}{\Gamma(N)} \right] R \dots\dots\dots (7)$$

여기에서 A 는 유역면적, N 는 Gamma함수인자(Gamma Function Argument), K 는 저류상수(Reservoir Storage Constant), $\Gamma(N)$ 은 Gamma함수, Q_E 는 직접유출량, R 은 유효강우량, t 는 시간을 나타낸다.

일반적으로 한 유역의 순간단위도곡선은 해당유역의 실측수문자료를 이용하여 유효강우주상도(Effective Rainfall Hyetograph)와 직접유출수문곡선(Direct Runoff Hydrograph)을 분석하고 또한 모멘트원리를 이용하여 구하게 된다. 유효강우주상도모멘트, M_{ERH} , 직접유출수문곡선모멘트, M_{DRH} 및 순간단위도곡선모멘트, M_{UH} 의 제1, 제2모멘트는 아래와 같은 관계를 갖고 있다.

$$NK = M_{UH1} = M_{DRH1} - M_{ERH1} \dots\dots (8)$$

$$N(N+1)K^2 = M_{UH2} = M_{DRH2} - M_{ERH2} - 2NKM_{ERH1} \dots (9)$$

여기에서 M_{DRH1} 은 직접유출수문곡선의 제1차모멘트, M_{DRH2} 는 직접유출수문곡선의 제2차모멘트, M_{ERH1} 은 유효강우주상도의 제1차모멘트, M_{ERH2} 는 유효강우주상도의 제2차모멘트이다.

라. 선형시변 유출수문곡선모형

선형시변모형은 1969년 Chieu와 Bittler⁵⁾가 제시한 모형으로 식(4)를 식(6)에 대입하여 다음의 식(10)을 제시하였다.

$$Q(t) = \left[\frac{1}{K(t)D + \frac{dK(t)}{dt} + 1} \right] I(t) \dots (10)$$

여기에서 $D = d/dt$ 는 일계미분연산자이다. 식(10)에서 $\left[\frac{1}{K(t)D + \frac{dK(t)}{dt} + 1} \right]$ 은 선형시변변환함수로서 강우가 유출로 바뀌는 과정을 나타낸다. 식(10)을 다시쓰면 식(11)과 같이 된다.

$$K(t) \frac{dQ(t)}{dt} + \left(\frac{dK(t)}{dt} + 1 \right) Q(t) = I(t) \dots\dots\dots (11)$$

식(11)은 일계미분방정식이 되며 식중 저류상수, $K(t)$ 및 그 시간변화율, $\frac{dK(t)}{dt}$ 와 강우강도, $I(t)$ 는 시간 t 의 함수이다. 매 시간별 $Q(t)$ 를 구하기 위해서는 이에 대응하는 $K(t)$, $\frac{dK(t)}{dt}$ 및 $I(t)$ 가 구해져야 한다. 저류상수, $K(t)$ 의 값은 다음의 식(12) 및 (13)에 대입해서연립하여 구하게 된다.

$$S(t) = \int_0^t [I(t) - Q(t)] dt \dots\dots\dots (12)$$

$$K(t) = \frac{S(t)}{Q(t)} \dots\dots\dots (13)$$

2. 모형의 개발

가. 선형시변모형을 위한 저류상수, K 및 감마함수인자, N 의 전산프로그램의 구성

저류상수, K 와 감마함수인자, N 의 전산프로그램은 각 홍수사상별 유효강우량과 직접유출량을 계산한 후 이를 각각에 모멘트원리를 적용한 유효강우주상도모멘트, 직접유출수문곡선모멘트 및 제1, 제2순간단위도곡선모멘트에 의해 이루어진 식(8)과 식(9)의 상호관계로서 구성하였다.

나. 선형불시변 유출수문곡선모형을 위한 전산프로그램의 구성

선형불시변모형의 전산프로그램은 가.의 모멘트법에 의한 전산프로그램에서 구해진 저류상수, K 와 감마함수인자, N 그리고 유역면적, A , 감마함수, $\Gamma(N)$ 및 유효강우량, R 을 근간으로하여 개발하였다.

다. 선형시변 유출수문곡선모형을 위한 전산프로그램의 구성

선형시변 유출수문곡선모형의 전산프로그램은 각 호우사상별로 구해진 저류상수, $K(t)$ 와 그 시간변화율, $dK(t)/dt$ 및 강우강도, $I(t)$ 를 Runge-Kutta 수치해석법에 의해 구성되었다.

Ⅲ. 수문자료 및 분석방법

1. 대상유역선정과 유역특성 및 수위-유량관측자료

본 분석에 사용된 대상유역은 한국의 주요 수계인 한강, 금강, 낙동강 및 영산강의 9개 유역을 대상으로 하였다.¹²⁾ 본 분석 대상유역의 유역특성으로서는 Table-1에서 보는 바와 같이 유역면적은 55.9~140.7km² 이고 분류연장, 하천중심장, 유역경사, 유역평균폭 및 형상계수는 각각 16.55~25.95km, 6.85~14.3km,

2.66~17.41m/km, 3.38~7.29 및 0.16~0.38의 범위를 나타내고 있다. 또한 수위-유량관측자료는 각 대상유역별로 건설부와 농어촌진흥공사에 의해 수행된 자기수위 및 유량관측자료에 의거하였다. ^{13, 14)} (Table-1. 참조)

2. 강우량자료

각 수계별 분석대상유역인 20개소의 강우량자료는 건설부소관의 15개소분, 농어촌진흥공사의 4개소분, 중앙관상대 소관의 5개소분을 사용하였다.

3. 분석방법

가. 유역평균강우량

각 수계별 대상유역에 대한 유역평균강우량은 티센법(Thiessen Method)에 의해 구하였다.

나. 유효우량과 직접유출량의 유도

본 분석에 있어서 손실우량은 초기손실량과 그후의 손실우량으로 나누어서 취급하는 방법을 채택하였고 초기손실로서는 수문곡선의 상승기점까지의 강우량을 취하고 그후는 강우강도에 관계없이 일정치의 손실우량을 취하는 일정량손실우량법에 의해 분리하였다.

다. 직접유출량과 기저유출량의 분리

최종적으로 선정된 25개의 유량도로부터 직접유출량과 기저유출량을 정확히 분리하기 위하여 수문곡선감수부의 제2변곡점까지의 윗부분 유량을 직접유출량으로, 그 아래를 기저유출량으로 하는 감수곡선법을 사용하였다.^{15, 16)}

라. 선형불시변유출수문곡선모형(LTIM)의 매개변수 산정

대상유역의 유효강우주상도모멘트, 직접유출수문곡선모멘트를 구한후 이들 결과에 의해 감마함수인자, N 과 저류상수, K 값을 구한다.

마. 선형시변유출수문곡선모형(LTVM)의 매개변수 산정

선형시변모형에 있어서는 시간 t 의 함수인 유효강우강도, $I(t)$ 를 유효강우용적으로 환산

Table-1. Physical characteristics for the applied watersheds of main river system and gauging stations for water stage measurement

River System	Water-shed	Water-shed Area (km)	Length of Main stream(km)	Length of Centroid (km)	Main Stream Slope (m/km)	Average Basin Width (km)	Shape Factor	Gauge Type	Control Authorities	Location
Han River	Jeem-okjung	55.9	16.55	6.85	17.38	3.38	0.20	Self-Recording	RDC	Long.128° 28' 30" Lati. 37° 37' 00"
	Haba-njung	82.0	19.3	8.65	12.36	4.25	0.22	Self-Recording	MOC	Long.128° 26' 30" Lati. 37° 27' 10"
	Jang-pyung	105.1	25.95	14.3	17.41	4.05	0.16	Self-Recording	MOC	Long.128° 24' 55" Lati. 37° 35' 00"
	Maesan	112.0	19.98	7.8	2.66	5.60	0.29	Self-Recording	MOC	Long.127° 26' 20" Lati. 37° 06' 10"
Geum River	Tanbu	80.1	19.2	10.1	7.52	4.17	0.22	Self-Recording	MOC	Long.127° 48' 48" Lati. 37° 26' 00"
	Koeun	85.3	17.65	9.1	6.62	4.83	0.27	Self-Recording	MOC	Long.127° 33' 35" Lati. 36° 34' 15"
Nag Dong River	Supy-ung	84.3	19.4	7.9	13.60	4.34	0.22	Self-Recording	MOC	Long.128° 18' 10" Lati. 36° 42' 50"
Yeong San River	Hwa-sun	97.4	20.03	9.0	6.85	4.88	0.24	Self-Recording	RDC	Long.126° 58' 40" Lati. 37° 02' 40"
	Ipgyo	140.7	19.3	7.4	6.09	7.29	0.38	Self-Recording	RDC	Long.126° 59' 20" Lati. 34° 55' 45"

MOC : Ministry of Construction, RDC : Rural Development Corporation

한 R_E 를 구하고 매개변수인 저류상수, $K(t)$ 를 구한다.

바. 선형불시변 및 선형시변 유출수문곡선 모형의 비교

각각의 수분모형에 의한 침투홍수량과 침투 유량도달시간 및 직접유출수문곡선의 형상에 관한 비교 분석을 수행한다.

IV. 결과 및 고찰

1. 유역평균강우량

수계별 9개소 유역에 대한 유역평균강우량은 Thiessen의 가중법을 사용하였으며 다만 금강의 고은유역과 영산강의 입교유역은 각각 1개 강우관측소 밖에 없어 해당유역에서의 우량을 유역평균강우량으로 하여 분석하였다.¹⁶⁾

2. 유효우량과 직접유출량의 유도

4개 수계 9개 유역에 대한 25개 호우사상

으로부터 유효우량과 직접유출량의 결과를 구하였으며 전 유역에 걸친 유효우량과 직접유출량은 각각 3.31~93.07mm, 77.6~2895.5m³/sec의 범위를 나타내고 있다.

3. 선형불시변 및 선형시변 유출수문곡선모형의 매개변수 보정

일반적으로 수문모형의 보정기법은 시행착오법과 수학적보정(일명 자동보정) 등으로 나뉘어 진다. 이에 본 연구에서는 선형불시변과 선형시변 2개 모형의 매개변수가 1~2개의 적은 수임을 고려하여 시행착오법을 적용하였다. 선형불시변모형에 있어서는 모멘트법에 의하여 구해진 감마함수인자, N과 저류상수, K를 매개변수로 하여 먼저 N을 고정하고 구해진 K를 초기치로 하여 모형에 의한 수문곡선의 형상 및 침투유량과 실측수문곡선의 형상 및 침투유량에 비교적 잘 접근 될수 있는

적정 매개변수, K값을 구하였으며 그 결과는 Table-2와 같다. 여기에서 전체 대상유역에서의 감마함수인자, N과 저류상수, K의 값은 각각 1.28~8.05 및 1.2~6.42의 범위를 나타내고 있다. 한편, 선형시변모형에 있어서는 보정하고자 하는 K(t)가 시변매개변수로서 각 사상별로 구해진 K(t) 값을 초기치로 하여 선형시변모형에 의한 수문곡선의 침두유량과 실측수문곡선의 침두유량이 잘 일치되는 최적 매개변수, K(t)치를 구하였다.

4. 보정된 모형별 모의결과치와 실측치와의 비교

가. 침두유량 및 침두유량도달시간의 비교 분석

선형불시변(LTIM) 및 선형시변유출수문곡선모형(LTVM)의 모의침두유량을 실측침두유량과 비교하고 선형불시변 및 선형시변 유출수문곡선모형에 의한 침두유량도달시간을 실측침두유량도달시간과 비교한 결과는 Table-3과 같으며 이에 대한 산포도를 그린 결과, Fig. 1 및 Fig. 2에서 보는 바와 같이 선형시변모형에

의한 결과치가 선형불시변모형에 의한 결과치에 비해 실측치에 훨씬 접근되는 좋은 양상을 보여주고 있다. 그리고 선형시변모형과 선형불시변모형에 의한 모의침두유량이 각각 10.86~246.12, 10.75~209.01m³/sec로 선형시변모형의 것이 실측침두유량의 10.8~246.5m³/sec 에 훨씬 접근되는 좋은 결과를 보여주고 있으며 선형시변모형과 선형불시변모형의 침두유량도달시간은 각각 3.0~14.0, 1.0~10.7hrs의 범위로서 선형시변모형의 것이 실측침두유량도달시간, 2.0~13.0hrs 에 매우 근접한 좋은 결과를 나타내고 있다. 한편, 실측침두유량에 대한 선형시변모형에 의거한 모의침두유량의 평균오차는 0.75%로서 선형불시변모형에 의한 모의침두유량의 평균오차, 5.42%에 비해 훨씬 높은 접근도를 나타내고 있고 모형별 침두유량도달시간의 실측침두유량도달시간에 대한 오차분석을 시도한 결과 실측침두유량도달시간에 대한 선형시변모형에 의거한 침두유량도달시간의 평균오차는 16.44%로서 선형불시변모형에 의거한 19.89%에 비해 좋은 결과를 보여주고 있다.

Table-2. Parameters for Linear, Time-Invariant Model of applied watersheds

River System	Watershed	Occurrence period of rainfall event	Watershed area(km ²)	Gamma function argument, N	Storage constant, K	Gamma function N, Γ(N)	Effective rainfall R(10mm)
Han River	leemokjung	1. '87. 6. 7.09:00- 6. 8.17:00	55.9	2.97	3.32	1.947	2.173
	Habanjung	1. '87. 6. 7.10:00- 6. 8.20:00	82.0	2.70	4.23	1.545	1.499
	Jangpyung	1. '87. 6. 7.08:00- 6. 9.05:00	105.1	2.64	5.51	1.475	3.836
	Maesan	1. '74. 5.14.06:00- 5.15.07:00	112.0	8.05	1.51	5575.321	1.819
		2. '74. 7. 8.20:00- 7.10.04:00		3.96	3.96	3.675	9.307
		3. '75. 8. 6.06:00- 8. 7.11:00		1.88	5.96	0.955	1.167
Geum River	Tanbu	1. '87. 6. 7.16:00- 6. 8.23:00	80.1	3.92	3.24	5.45	2.472
	Koeun	1. '73. 7. 2.08:00- 7. 3.06:00	85.3	2.31	2.65	1.174	1.148
		2. '73. 7.30.04:00- 7.31.05:00		3.79	2.09	4.638	0.409
Nag Dong River	Supyung	1. '73. 7.30.07:00- 7.31.03:00	84.3	4.37	1.32	9.731	0.331
		2. '74. 4. 7.07:00- 4. 8.18:00		1.97	6.42	0.988	2.077
		3. '75. 4.26.11:00- 4.27.08:00		4.26	2.12	8.396	1.026
		4. '75. 6.29.18:00- 6.30.11:00		1.28	3.53	0.901	1.081
Yeong San River	Hwasun	1. '74.10. 1.22:00-10. 2.13:00	97.7	2.26	2.17	1.139	0.864
	Ipgyo	1. '74. 6.17.03:00-10.17.20:00	140.7	4.2	1.3	7.757	1.698
2. '75. 4.26.13:00- 4.27.12:00		7.11		1.2	885.53	4.028	

따라서 모형별 모의침두유량과 실측침두유량과의 상관성 분석 및 모형별 침두유량도달시간과 실측침두유량도달시간과의 상관성 분석을 시도한 결과 Table-4에서 보는 바와 같이 2개 모형에 의한 침두유량과 침두유량도달시간이 공히 고도의 유의성이 인정되었으며 특히 선형시변모형에 의한 모의침두유량과 침두유량도달시간의 상관계수는 0.999로서 선형불시변모형의 모의침두유량과 침두유량도달시간의 상관계수 0.978과 0.886보다 다소 높은 고도의 유의성이 인정되었다.

나. 유출수문곡선형상의 비교 분석

대상유역인 한강, 금강, 낙동강 및 영산강수계의 9개 유역에 대한 16개 호우사상의 실측 유출수문곡선과 보정된 모형별 유출수문곡선을 구하였으며 이의 예로서 한강의 이목정, 금강의 탄부, 낙동강의 수평 및 영산강의 화

순유역의 각 1개 호우사상에 대한 실측유출수문곡선과 선형불시변 및 선형시변모형의 유출수문곡선을 나타낸 결과는 Fig. 3-Fig. 6과 같다. 예의 4개 유역을 포함한 전 대상유역에 걸쳐서 선형시변모형에 의한 유출수문곡선의 형상이 선형불시변모형의 것에 비해 실측유출수문곡선형상에 매우 근접됨을 보여주고 있다.

5. 매개변수와 유역특성과의 회귀분석

선형불시변모형의 매개변수인 감마함수인자, N과 저류상수, K를 유역특성과의 상관성을 분석한 결과 N과 K는 각각 유역특성인 유역면적, 본류연장, 하천중심장 및 하천평균경사를 포함하는 다음의 식(14) 및 식(15)와 같은 회귀관계를 갖는다. 이들의 관계를 도식한 결과는 각각 Fig. 7 및 Fig. 8과 같다.

Table-3. Comparison of simulated peak discharge and time to peak between LTIM and LTVM to the observed peak discharge for calibration

River System	Watershed	Occurrence period of rainfall event	Q _p			RE		T _p			RE	
			Obs.	LTIM	LTVM	LTIM	LTVM	Obs.	LTIM	LTVM	LTIM	LTVM
Han River	Jeemokjung	1. '87. 6. 7.09:00- 6. 8.17:00	27.4	27.78	27.83	1.39	1.57	6.0	6.5	7.0	8.33	16.67
	Habanjung	1. '87. 6. 7.10:00- 6. 8.20:00	23.9	23.53	23.3	1.55	2.51	8.0	7.2	9.0	10.0	12.5
	Jangpyung	1. '87. 6. 7.08:00- 6. 9.05:00	60.9	60.20	61.9	1.15	1.64	8.0	9.1	9.0	13.75	12.5
	Maesan	1. '74. 5.14.06:00- 5.15.07:00	59.6	55.68	59.53	6.58	0.12	12.0	10.7	13.0	10.83	8.33
2. '74. 7. 8.20:00- 7.10.04:00		246.5	175.69	246.12	28.73	0.15	13.0	10.3	14.0	20.77	7.69	
3. '75. 8. 6.06:00- 8. 7.11:00		26.9	23.67	26.71	12.01	0.71	6.0	5.2	7.0	13.33	16.67	
Geum River	Tanbu	1. '87. 6. 7.16:00- 6. 8.23:00	42.4	38.64	42.08	8.87	0.75	11.0	9.5	12.0	13.64	9.09
	Koeun	1. '73. 7. 2.08:00- 7. 3.06:00	35.9	33.65	35.47	6.27	1.20	4.0	3.5	5.0	12.5	25.0
2. '73. 7.30.04:00- 7.31.05:00		10.8	10.75	10.86	0.46	0.56	6.0	5.8	7.0	3.33	16.67	
Nag Dong River	Supyung	1. '73. 7.30.07:00- 7.31.03:00	13.7	12.48	13.83	8.91	0.95	5.0	4.5	6.0	10.0	20.0
		2. '74. 4. 7.07:00- 4. 8.18:00	28.5	28.25	28.34	0.88	0.56	10.0	6.2	11.0	38.0	10.0
		3. '75. 4.26.11:00- 4.27.08:00	23.9	24.42	23.89	2.18	0.04	7.0	6.9	8.0	1.43	14.29
		4. '75. 6.29.18:00- 6.30.11:00	42.4	42.16	42.28	0.57	0.28	2.0	1.0	3.0	50.0	50.0
Yeong River	Hwasun	1. '74.10. 1.22:00-10. 2.13:00	38.0	36.02	38.17	5.21	0.45	5.0	2.7	6.0	46.0	20.0
San River	Ipygo	1. '74. 6.17.03:00- 6.17.20:00	111.5	110.41	111.25	0.98	0.22	8.0	4.2	9.0	47.5	12.5
		2. '75. 4.26.13:00- 4.27.12:00	210.9	209.01	210.36	0.90	0.90	9.0	7.3	10.0	18.89	11.11
Mean						5.42	0.75				19.89	16.44

Obs. : Observed,

LTIM : Linear Time Invariant Model

RE : Relative Error

LTVM : Linear Time Variant Model

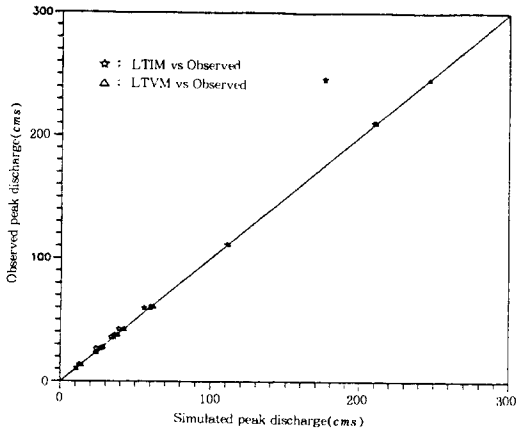


Fig. 1. Comparison of peak discharge by different models of applied watersheds

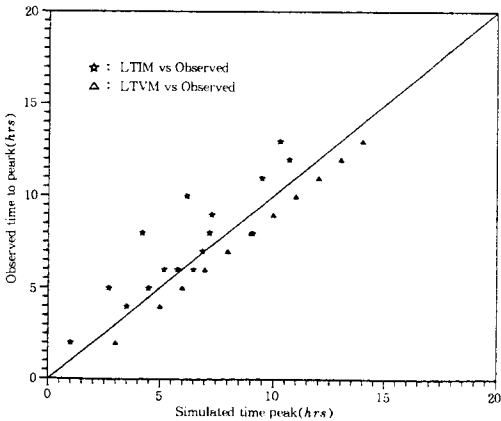


Fig. 2. Comparison of time to peak by different models of applied watersheds

Table-4. Correlation analysis of simulated peak discharge and time to peak calculated by different models for calibration

Model	Correlation coefficient	
	Q_p	T_p
LTIM	0.978**	0.886**
LTVM	0.999**	0.999**

$$K = 0.419 \left(\frac{L}{S} \right) \quad (r=0.88^{**}) \quad \dots (14)$$

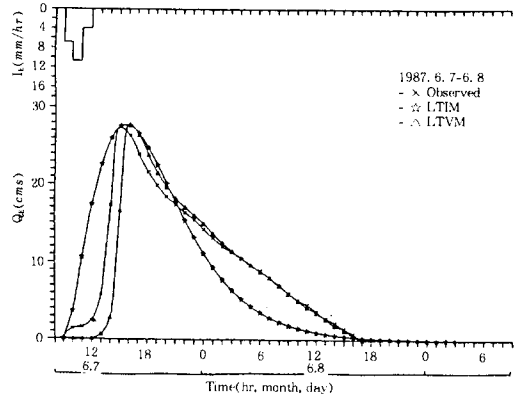


Fig. 3. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for calibration at Ieemokjung watershed of Han river

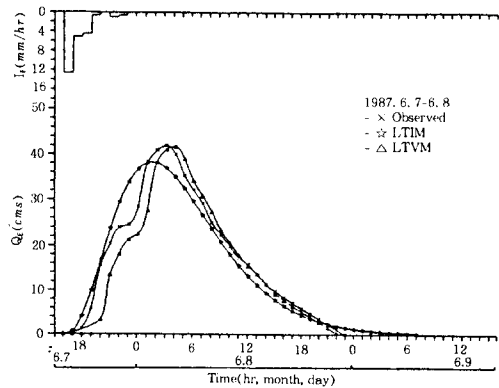


Fig. 4. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for calibration at Tanbu watershed of Geum river

$$N = A^{0.713} L^{-0.343} L_{ca}^{-0.4} S^{-0.064} \quad (r=0.98^{**}) \quad \dots (15)$$

여기에서 A는 유역면적, L은 본류연장, L_{ca} 는 하천중심장, S는 하천평균경사를 나타낸다. 한편 선형시변모형의 매개변수인 $K(t)$ 는 시변성 매개변수이기 때문에 유역특성치와의 회귀분석은 불가하였다.

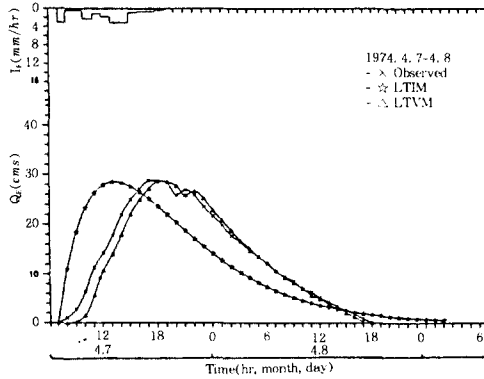


Fig. 5. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for calibration at Supyung watershed of Nag Dong river

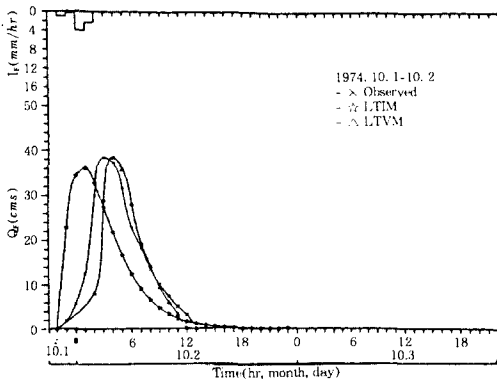


Fig. 6. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for calibration at Hwasun watershed of Yeong San river

6. 모형의 검증

가. 첨두유량 및 첨두유량도달시간의 비교 분석

모형에 이용된 매개변수와 모의발생치는 실측치의 범위를 크게 벗어나지 말아야하고 신뢰성이 높아야 한다. 따라서 2개 모형의 검증은 매개변수보정에 사용된 수문사상과 달리하여 실시하였다. 검증에 사용한 매개변수는 해

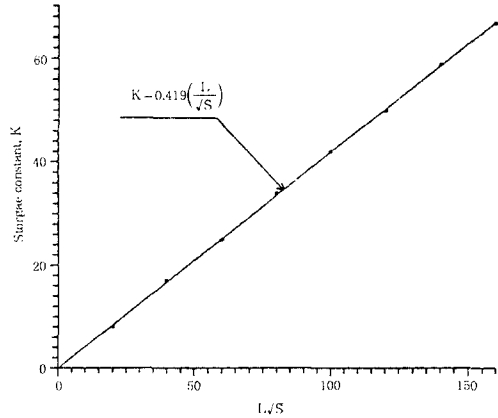


Fig. 7. Relationship between K and watershed characteristics

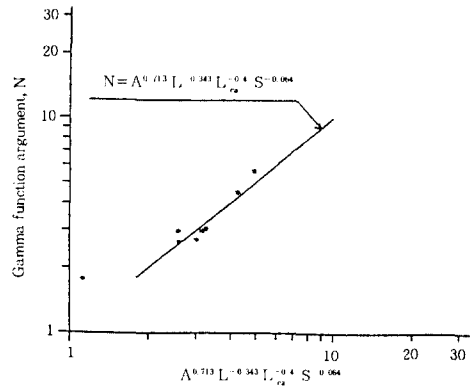


Fig. 8. Relationship between N and watershed characteristics

당유역의 보정된 값을 이용하여 각 모형에 의한 첨두유량과 첨두유량도달시간으로 검증하였다. 검증방법은 매개변수보정시와 동일하게 상대오차와 상관관계로 비교하였다. Table. 5는 모의첨두유량과 실측첨두유량간의 호우사상별 상대오차를 분석한 결과이며 첨두유량에 대해 검증된 상대오차는 0.31~7.95% 범위를 나타내었고 평균적으로 선형불시변모형이 3.59%, 선형시변모형이 1.02%로서 보정시의 상대오차인 5.42%, 0.75%와 비슷한 오차를 나타내고 있으며, 첨두유량도달시간에 대해

Table-5. Comparison of simulated peak discharge and time to peak between LTIM and LTVM to the observed peak discharge for verification

River System	Watershed	Occurence period of rainfall event	Q _p			RE		T _p			RE	
			Obs.	LTIM	LTVM	LTIM	LTVM	Obs.	LTIM	LTVM	LTIM	LTVM
Han River	Jeemokjung	'87.10.10.21:00-10.12.09:00	23.8	23.45	23.92	1.47	0.5	11.0	6.8	12.0	38.18	9.09
	Habanjung	'86.10.11.01:00-10.12.12:00	25.7	26.92	26.49	4.75	3.07	10.0	8.2	11.0	18.0	16.67
	Jangpyung	'87.10.10.22:00-10.12.07:00	48.3	47.12	49.04	2.44	1.53	11.0	6.9	12.0	37.27	9.09
	Maesan	'74. 5.19.17:00- 5.20.22:00	107.3	104.23	106.95	2.86	0.33	15.0	9.6	16.0	20.17	6.67
Geum River	Tanbu	'87. 8.13.13:00- 8.14.09:00	158.9	161.52	158.41	1.65	0.31	7.0	4.0	8.0	42.86	14.29
	Koeun	'73. 7.27.14:00- 7.28.13:00	23.9	22.0	23.56	7.95	1.42	3.0	3.3	4.0	10.0	33.33
Nag Dong River	Supyung	'73. 5.14.05:00- 5.15.16:00	17.5	17.89	17.65	2.23	0.86	10.0	7.8	11.0	22.0	10.0
	Hwasun	'74. 7. 4.17:00- 7. 5.11:00	34.1	62.64	64.39	2.28	0.45	3.0	4.7	4.0	56.67	33.33
	Ipgyo	'74. 7. 6.11:00- 7. 7.07:00	109.1	101.79	109.88	6.70	0.71	10.0	7.0	11.0	30.0	10.0
Mean							3.59	1.02			30.57	15.83

Obs. : Observed
 RE : Relative Error
 LTIM : Linear Time Invariant Model
 LTVM : Linear Time Variant Model

검정된 상대오차는 6.67~56.67% 범위를 보였고 평균적으로 선형시변모형이 15.83%로서 보정시의 16.44% 보다 다소 줄어든 값을 나타내고 있는 반면 선형불시변모형이 30.57%로 보정시 19.89%에 비해 다소 높게 나타났다. 이에 더해, 상관성 분석에 의한 검정을 시도한 결과 Table-6에서 보는 바와 같이 첨두유량은 선형불시변모형이 상관계수 0.998, 선형시변모형이 0.999이고 보정시는 0.978과 0.999로서 모두 고도의 유의성을 나타내었고 첨두유량도달시간 역시 선형불시변모형이 상관계수 0.899, 선형시변모형이 0.999로서 보정시의 0.886과 0.999와 함께 고도의 유의성을 보임으로서 전반적으로 볼때 첨두유량 및 첨두유량도달시간의 검정 결과가 양호함을 알 수 있다.

Table-6. Correlation analysis of simulated peak discharge and time to peak by different models with observed peak discharge for varification

Model	Correlation coefficient	
	Q _p	T _p
LTIM	0.998**	0.899**
LTVM	0.999**	0.999**

나. 유출수문곡선형상의 비교 분석

대상유역인 한강, 금강, 낙동강 및 영산강수계의 9개 유역에 대한 9개 호우사상의 실측유출수문곡선과 모형별 유출수문곡선을 구하였으며 이의 예로서 한강의 이목정, 금강의 탄부, 낙동강의 수평 및 영산강의 화순유역의 각 1개 호우사상에 대한 실측유출수문곡선과 선형불시변 및 선형시변모형의 유출수문곡선을 나타낸 결과는 Fig. 9-Fig. 12와 같다. 이상

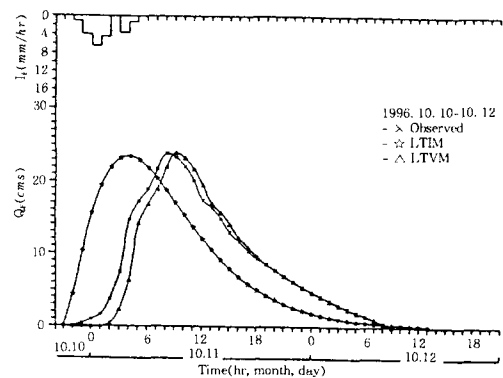


Fig. 9. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for verification at Jeemokjung watershed of Han river

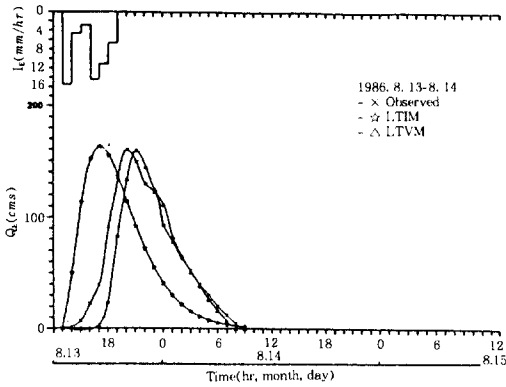


Fig. 10. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for verification at Tanbu watershed of Geum river

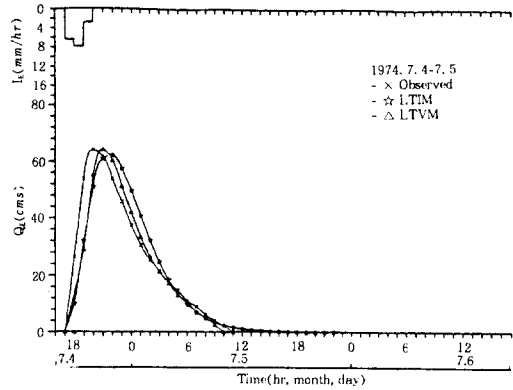


Fig. 12. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for verification at Hwasun watershed of Yeong San river

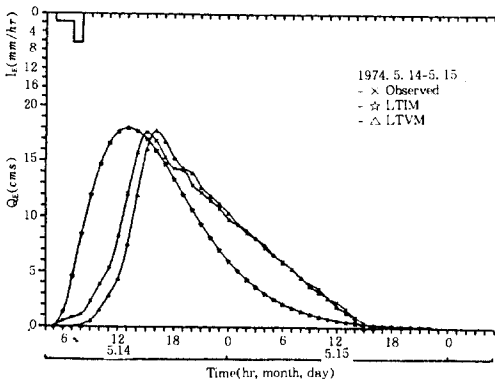


Fig. 11. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for verification at Supyung watershed of Nag Dong river

의 결과를 종합해 보면 2개의 유출수문곡선모형 중 선형시변 유출수문곡선모형에 의해 모의된 첨두유량, 첨두유량도달시간 및 유출수문곡선형상이 선형불시변 유출수문곡선모형의 것에 비해 좋은 결과를 가져왔음을 볼 수 있다.

V. 결론

저수지를 위시한 각종 농업수리구조물의 신

빙성이 결여된 설계홍수량의 제시야 말로 구조물의 파괴위험도는 물론 이로 인한 범람으로 막대한 인명과 재산상의 피해를 연례행사처럼 겪어 왔음은 주지의 사실이다. 따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 우리나라의 주요수계인 한강, 금강, 낙동강 및 영산강의 상류 9개 유역(55.9~140.7 km²)을 대상으로 단시간의 호우와 균일한 강우강도의 호우사상을 택하고 선형불시변 및 선형시변, 2개의 유출수문곡선모형에 대한 첨두유량과 첨두유량도달시간 및 유출수문곡선형상을 실측치와 비교 분석 하였으며 이에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 선형불시변 유출수문곡선모형의 해석을 위해 필요한 매개변수인 저류상수와 감마함수인자를 모멘트법에 의해 구하였다.

2. 선형불시변 및 선형시변 유출수문곡선의 매개변수를 시행착오법에 의해 보정하고 선형불시변모형과 유역면적, 유역경사, 주류연장 및 하천중심장을 포함하는 유역특성과의 관계를 회귀분석 하였다.

3. 보정된 모형별 첨두유량의 실측첨두유량에 대한 평균상대오차는 선형시변모형의 것이

0.75%로서 선형불시변모형의 5.42%에 비해 좋은 결과를 나타내었고 또한 상관성 비교 분석을 시도한 결과 선형시변모형의 상관계수 0.999, 선형불시변모형의 상관계수 0.978로서 모두 고도의 유의성이 인정되면서 선형시변모형의 것이 다소 높은 유의성을 나타내었다.

4. 보정된 모형별 침투유량도달시간의 실측 침투유량도달시간에 대한 평균상대오차는 선형시변모형의 것이 16.44%로서 선형불시변모형의 19.89%에 비해 좋은 결과를 나타내었고 상관성 비교에 있어서도 선형시변모형의 상관계수가 0.999로서 선형불시변모형의 상관계수 0.886 보다 높은 유의성이 인정 되었다.

5. 보정된 모형별 유출수문곡선의 형상은 전 대상유역에 걸쳐 모두 선형시변모형에 의한 유출수문곡선이 선형불시변모형의 것에 비해 실측유출수문곡선형상에 보다 근접됨을 보여주고 있다.

6. 침투유출량과 침투유량도달시간에 관한 2개 모형의 검정을 상대오차와 상관관계로서 비교 분석한 결과 2개 모형인 선형불시변모형과 선형시변모형 모두 보정시의 상대오차에 비교적 접근하고 상관계수 역시 보정시와 같은 고도의 유의성을 보임으로서 비교적 검정 결과가 양호함을 나타내었다.

본 논문은 '94~'95 년도 한국과학재단의 연구지원(과제번호 941-0600-011-2)에 의하여 수행된 것임

참 고 문 헌

1. Agricultural Research Service; Linear Theory of Hydrologic System, U.S. Dept. of Agri., Tech. Bull., No. 1468, pp. 75-125, 127-231, 1973.

2. Bayazit, M.; Instantaneous Unit Hydrograph Derivation by Spectral Analysis and its numerical application, Symposium on Hydrology and Water Resources Development, Turkey, pp.127-143, 1966.

3. Butler, S.S.; Engineering Hydrology, Prentice Hall Inc. pp. 203-209, 1959.

4. Chow, V.T.; Handbook of Applied Hydrology, pp.9-8~48, 14-2~35, 21-24~54, 25-2~25-8, 25-35~25-45, McGraw Hill Book Co., N.Y., 1968.

5. Chieu, Chao-lin and R.P. Bittler; Linear time varying Model of Rainfall-Runoff Relation, W.R.R. Vol.5, No.2, April, 1969.

6. Chieu, Chao-lin and J.T. Huang; Nonlinear time varying Model of Rainfall-Runoff Relation, W.R.R. Vol.6 No. 5, 1970.

7. Diskin, M.H.; A basic study of the linearity of the Rainfall-Runoff process in Watersheds, Dissertation for the Ph.D. Univ. of Illinois, pp. 1-45, 1964.

8. Dooge, J.C.; A General theory of the Unit Hydrograph, Jour. of Geophysical Research, Vol. 64, No. 2, pp. 241-259, 1959.

9. Gray, D.M.; Derivation of Hydrographs for small Watersheds from measurable physical characteristics, Agricultural and Home economics, Experiment Station of Iowa State Univ., Res. Bull. 506, pp. 523-526, 1962.

10. 건설부; 한국의 홍수, pp.43-89, 1967-1969.

11. 건설부; 한국의 홍수, pp. 9-105, 1973.

12. 건설부, 산업기지개발공사; 한국하천조사서, pp. 17-56, 80-84, 97-158, 367-

- 393, 1974.
13. 건설부;홍수수문자료집, 수자원관리기법개발연구조사보고서 별책부록, pp. 24-312, 1991. 12.
 14. 건설부;하천유량자료의 계산, 수자원관리기법개발연구조사보고서 별책부록, pp. 3-191, 1992. 12.
 15. Linsley, R.K. and Others;Hydrology for Engineers, pp. 193-243, McGraw Hill Book Co., Inc., 1958.
 16. 이순혁;한국 주요수계의 소유역에 대한 순간단위도 유도에 관한 연구, 서울대 농학박사 학위논문, pp. 11-29, 1977.
 17. Nash, J.E. ; The Form of the Instantaneous Unit Hydrograph, Hyd. Res. Station, England, pp. 114-121, 1957.
 18. Nash, J.E.;Determining Runoff from Rainfall, Ins. of C.E., Vol. No. 6282, pp. 165-183, 1958.
 19. Nash, J.E.;A Linear Transformation of a Discharge Record, IAHR, 9th Convention, Belgrade, pp. III/13-1~III/13-2, 1961.
 20. Prasad, R.;A Nonlinear Hydrologic System Response Model, Jour. of Hyd. Div. ASCE, Vol. 93, No. Hyd. 4, Proc. Paper 5350, pp. 201-218, 1967.
 21. Snyder, F.F. ; Synthetic Unit Graphs, Trans. of Ame. Geophys. Union, Vol. 19, pp. 447-452, 1938.
 22. Soil Conservation Service;Hydrology Section 4, pp. 15-1 ~ 15-16. 16-1~16-25. U.S. Dept. of Agriculture, 1971.
 23. Wang, Ru Yih and I.P. Wu;Characteristics of Short Duration Unit Hydrograph, Trans. of Ame. Soc. of Agri. Eng. Vol. 15, No. 3, pp. 452-456, 1972.
 24. Wu, I.P.;Hydrological Data and Peak Discharge Determination of Small Hawaiian Watersheds, W.R.C, U.O.H., Tech. Report. No. 15, pp. 35-66, 1967.
 25. Yevjevich, V.M.;Research Data Assembly for Small Watersheds Floods, Part II, Colorado Univ., Experiment Station, CER 67~68-13, pp. 1-50, 1967.
 26. 中安米藏;治水計劃における洪水流量について, 綜合印刷出版株式會社, pp. 5-146, 1972.
- (접수일자 : 1995년 4월 10일)