

농업수리구조물의 적정설계홍수량 유도를 위한 유출수문곡선 모형의 개발(II)

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

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

Summary

This study was conducted to develop an optimal runoff hydrograph model by comparison of the peak discharge and time to peak between observed and simulated flows derived by four different models, that is, linear time-invariant, linear time-variant, nonlinear time-invariant and nonlinear time-variant models under the conditions of heavy rainfalls with regionally uniform rainfall intensity in short durations at nine small watersheds.

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

1. Parameters for four models including linear time-invariant, linear time-variant, nonlinear time-invariant and nonlinear time-variant models were calibrated using a trial and error method with rainfall and runoff data for the applied watersheds. Regression analysis among parameters, rainfall and watershed characteristics were established for both linear time-invariant and nonlinear time-invariant models.

2. Correlation coefficients of the simulated peak discharge of calibrated runoff hydrographs by using four models were shown to be a high significant to the peak of observed runoff hydrographs. Especially, it can be concluded that the simulated peak discharge of a linear time-variant model is approaching more closely to the observed runoff hydrograph in comparison with those of three models in the applied watersheds.

3. Correlation coefficients of the simulated time to peak of calibrated runoff hydrographs by using a linear time-variant model were shown to be a high significant to

* 충북대학교 농과대학
** 충북대학교 농업과학연구소
*** 충북대학교 대학원

키워드 : 비선형 시변 유출수문곡선 모형, 비선형 불시변 유출수문곡선 모형, 첨두유량, Runge-Kutta 수치해석, 첨두시간

the time to peak of observed runoff hydrographs than those of the other models.

4. The peak discharge and time to peak of simulated runoff hydrographs by using linear time-variant model are verified to be approached more closely to those of observed runoff hydrographs than those of three models in the applied watersheds.

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

6. Simulated hydrographs using the nonlinear time-variant model which is based on more closely to the theoretical background of the natural runoff process are not closer to the observed runoff hydrographs in comparison with those of three models in the applied watersheds. Consequently, it is to be desired that further study for the nonlinear time-variant model should be continued with verification using rainfall-runoff data of the other watersheds in addition to the review of analytical techniques.

I. 서 론

우리나라는 비교적 풍부한 수자원을 갖고 있으나 강우의 계절적인 집중호우로 홍수유출을 야기시킴으로써, 매년 인명피해 및 막대한 사회경제적 손실을 입고 있음은 주지의 사실이다. 또한 우리나라가 받고 있는 3대 재해인 수해, 풍해, 한해 중에서 가장 큰 문제로 대두되고 있는 것이 역시 홍수피해이다. 특히 우리나라는 6, 7, 8, 9월에 걸친 강우의 계절적인 편재로 막대한 홍수량이 일시에 유출됨으로써 엄청난 홍수피해를 입게 되고, 더우기 최근의 공업발전에 따른 급격한 도시화 및 산업화로 도시인구의 집중화, 공공시설의 급증과 토지이용의 변화에 따른 홍수의 피해양상 역시 대형화 또는 다양화 되어가고 있는 실정이다.

이러한 홍수로 부터 유발되는 각종 피해를 줄이기 위해서는 제I보에서 언급한 바와 같이 보다 정확한 홍수유출수문곡선모형의 개발에 의한 적정설계홍수량의 제시가 우선적으로 해결해야 할 중차대한 과제임에 틀림없다.^{4,10,11,18)}

이에, 본 연구의 제II보에서는 제I보의 선형 불시변 유출수문곡선 모형과 선형 시변 유출

수문곡선 모형의 2개 모형에 의한 이론적 고찰, 수문곡선 모형별 개발, 모형별 매개변수의 유도, 모형별 보정과 검정에 의한 첨두유량과 첨두시간의 비교 분석에 이어, 비선형 불시변 유출수문곡선 모형 및 비선형 시변 유출수문곡선 모형의 개발, 모형별 매개변수의 유도, 모형별 보정과 검정에 의한 첨두유량 및 첨두시간의 비교 분석을 수행하고 이어서 전술한 4개 모형의 종합적인 비교 분석에 의해 최종적으로 적정수문곡선 모형을 유도하되로서 홍수와 가뭄의 피해를 동시에 막을 수 있는 농업용수원의 설계홍수량과 설계배수량등의 신빙성있는 설계지침을 제공하고자 한다.

II. 비선형 불시변 및 비선형 시변 유출수문곡선 모형의 이론적 분석 및 모형의 개발

1. 비선형 불시변 및 비선형 시변 유출수문곡선 모형의 이론적 고찰

가. 비선형 불시변 유출수문곡선 모형
비선형 불시변 모형은 제I보¹⁸⁾의 선형 및

비선형 저수지 이론에서 1967년 Prasad²²⁾의 식 (3)을 Chieu⁶⁾등이 유출수문곡선 상승부를 고려하여 제시한 저류량과 유출량과의 관계 식인 식 (5)¹⁸⁾에 대입하여 비선형 불시변 유출수문곡선 모형인 다음의 식 (1)을 제안하였다.

$$Q(t) = \left[\frac{1}{K_2 D^2 + K_1 M Q(t)^{M-1} D + 1} \right] I(t) \dots\dots\dots (1)$$

여기에서, $D^2 = \frac{d^2}{dt^2}$ 의 2계 미분연산자이며 $\frac{1}{K_2 D^2 + K_1 M Q(t)^{M-1} D + 1}$ 은 강우에서 유출로 변환되는 비선형 불시변 변환함수이다.

비선형 불시변 모형인 식 (1)을 다시 정리하면 다음과 같이 된다.

$$K_2 \frac{d^2 Q(t)}{dt^2} + K_1 M Q(t)^{M-1} \frac{dQ(t)}{dt} + Q(t) = I(t) \dots\dots\dots (2)$$

식 (2)는 2계 비선형 미분방정식이며 식중 K_1 , K_2 및 M 은 3개의 매개변수로서 실측유량기록에서 첨두유량, Q_P 와 이에 대응하는 저류량, S_{Q_P} 와의 관계를 전대수지상에 작도하여 회귀직선을 구한 후 이의 기울기인 M 과 또한 회귀직선의 절편인 K_1 을 구한다. 실측 수문자료로부터 첨두유량이 Q_P 가 될때 $\frac{dQ}{dt} = 0$ 이 되므로 제I보의 식 (3)으로부터

$$S(t) Q_P = K_1 Q_P(t)^M \dots\dots\dots (3)$$

의 관계가 구해진다. 이같이 구해진 M 과 K_1 을 가지고 이들 값을 제I보의 식 (3)에 대입하므로써 매개변수 K_2 값을 구하게 된다.

$$\text{즉, } K_2 = \frac{S(t) - K_1 Q(t)^M}{\frac{dQ(t)}{dt}} \dots\dots\dots (4)$$

비선형 불시변 모형의 식 (1)을 해석할 시에는 $Q(t)$ 와 $\frac{dQ(t)}{dt}$ 의 초기조건 Q_0 및 $\frac{dQ_0}{dt}$ 의 값과 시간별 유효강우강도인 $I(t)$ 가 주어 져야 한다.

나. 비선형 시변 유출수문곡선 모형

비선형 시변 유출수문곡선 모형은 제I보의 선형 불시변, 선형 시변 및 전술한 비선형 시변 모형들 보다 매우 복잡한 구조로서 이 모형의 해를 구하기 위해 Chieu⁶⁾등은 1970년 실측유출량 $Q(t)$ 와 계산된 저류량 $S(t)$ 를 기본으로하여 실측 수문곡선의 첨두유량을 중심으로 양편의 상승곡선과 하강곡선으로 나누어 2개의 서로 다른 수문곡선 모형을 위한 경험공식을 유도하였다. 먼저, 하강곡선에 있어서는 제I보의 식 (2)를 미분한 후 제I보의 식 (6)에 대입하므로써 다음의 식 (5)가 구해진다.

$$Q(t) = \left[\frac{1}{K_1 N_1 Q(t)^{N_1-1} D + 1} \right] I(t) \dots\dots (5)$$

식에서, N_1 과 K_1 은 매개변수이며 이는 실측 직접유출수문곡선의 하강부에서 구해질 수 있다. 즉, 하강곡선상의 $Q(t)$ 와 $S(t)$ 값을 가지고 전대수지상에 작도한후 이들의 회귀직선 관계를 얻으므로써 그 직선의 기울기가 N_1 이 되고 $Q(t)$ 가 1과 같을때 $S(t)$ 의 절편이 곧 K_1 된다. 따라서 $t > t_P$ 일시 즉, 유출수문곡선이 하강시 이를 위한 모형식은 식 (5)로부터 다음의 식 (6)으로 되어진다.

$$K_1 N_1 Q(t)^{N_1-1} \frac{dQ(t)}{dt} Q(t) = I(t) \dots\dots (6)$$

따라서, 식 (6)은 1계 비선형 미분방정식이 된다.

그리고, 상승곡선에 있어서는 제I보의 식 (5)의 저류량식을 미분한 후 제I보의 식 (6)의 수문방정식에 다시 대입하므로써 식 (7)을 구하게 된다.

$$Q(t) = \left[\frac{1}{f_2(t)D^2 + f_3(t)D + 1} \right] I(t) \dots (7)$$

식 중, $f_2(t) = K_2(t)N_2 \left(\frac{dQ(t)}{dt} \right)^{N_2-1}$

$$f_3(t) = K_1N_1Q(t)^{N_1-1} + \frac{dK_2(t)}{dt} \left(\frac{dQ(t)}{dt} \right)^{N_2-1}$$

여기에서 N_2 는 매개변수이며 $N_2(t)$ 는 강우 계속시간에 따른 변수이다.

$\frac{1}{f_2(t)D^2 + f_3(t)D + 1}$ 은 $I(t)$ 를 $Q(t)$ 로 변

환시키면 비선형 시변 변환함수이다.

따라서 $t \leq t_p$ 일시 즉, 유출수문곡선이 상승시의 모형식은 식 (6)을 다음의 식 (8)로 변환시키므로써 구할 수 있다.

$$K_2(t)N_2 \left(\frac{dQ(t)}{dt} \right)^{N_2-1} \left(\frac{d^2Q(t)}{dt^2} \right) + \left[K_1N_1Q(t)^{N_1-1} + \frac{dK_2(t)}{dt} \left(\frac{dQ(t)}{dt} \right)^{N_2-1} \right] \frac{dQ(t)}{dt} + Q(t) = I(t) \dots (8)$$

따라서, 식 (8)은 2계 비선형 미분방정식이 된다.

제I보의 식 (5)로부터

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

로 변환시킬 수 있으며 전술한 방법에 의해서 구해진 N_1 과 K_1 값을 $S(t) - K_1Q(t)^{N_1}$ 항에 대입 시킨 값과 $\frac{dQ(t)}{dt}$ 의 값을 전대수용지에 작도하므로써 직선관계를 구한후 그 기울기가 곧 구 하고자 하는 매개변수 N_2 가 되며 $K_2(t)$ 의 값은 실측 수문자료로부터 다음의 식 (9)에 의해 구 할 수 있다.

$$K_2(t) = \frac{S(t) - K_1Q(t)^{N_1}}{\left(\frac{dQ(t)}{dt} \right)^{N_2}} \dots (9)$$

2. 모형의 개발

가. 비선형 불시변 유출수문곡선 모형의 위 전산프로그램의 구성

비선형 불시변 유출수문곡선모형의 전산프로그램은 각 호우사상별로 구해진 저류상수, K_1 , K_2 와 지수상수, M 유효강우강도, $I(t)$ 그리고 초기유량, Q_0 와 이의 단위시간당 변화율, $\frac{dQ_0}{dt}$ 를 입력자료로 하고 모형에서의 1계

비선형 미분방정식은 Runge-Kutta 수치해석법에 의해 해를 구할 수 있도록 구성 되었으며 이에 관한 흐름도는 Fig. 1과 같다.

나. 비선형 시변 유출수문곡선 모형의 위 전산프로그램의 구성

비선형 시변 유출수문곡선 모형의 전산프로그램은 선정된 호우사상별로 실측 수문곡선의 하강부의 유출량, $Q(t)$ 와 저류량, $S(t)$ 간의 회귀직선에서 구해진 기울기인 지수상수, N_1 과 그 절편인 저류상수, K_1 그리고 $S(t) - K_1Q(t)^{N_1}$ 과 유출량변화율, $\frac{dQ(t)}{dt}$ 에 대한 회귀직선의 기울기, N_2 와 강우지속시간에 따른 변수, $K_2(t)$ 유효강우강도, $I(t)$ 초기유량, Q_0

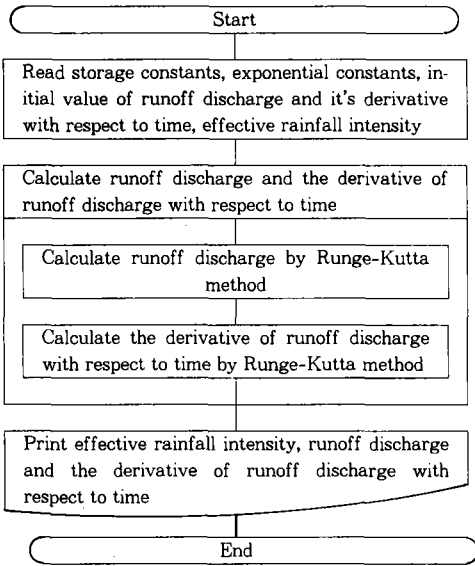


Fig. 1. Flow Chart of Nonlinear, Time-Invariant Model(NLTIM)

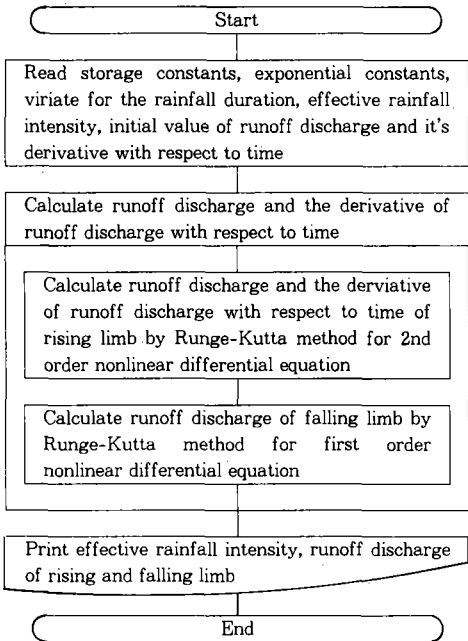


Fig. 2. Flow Chart of Nonlinear, Time-Variant Model(NLTVM)

와 이의 단위시간당 변화율, $\frac{dQ_0}{dt}$ 를 입력자료

로 하였고 본 모형의 해석을 위한 1계 비선형 미분방정식과 2계 비선형 미분방정식의 해는 Runge-Kutta 수치해석법에 의해 구할 수 있도록 구성되었으며 이에 관한 흐름도는 Fig. 2와 같다.

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 유역면적을 위시한 본류연장, 하천중심장, 유역경사, 유역평균폭, 형상계수 등은 제I보의 Table-1과 같다. 또한 수위-유량관측자료는 각 대상유역별로 건설부와 농어촌진흥공사에 의해 수행된 자기수위 및 유량관측자료에 의거하였다.^{13,14)}

2. 강우량자료

각 수계별 분석대상유역인 20개소의 강우량 자료는 건설부 소관의 15개소분, 농어촌진흥공사의 4개소분, 중앙관상대 소관의 5개소분을 사용하였다.

3. 분석방법

가. 유역평균강우량

각 수계별 대상유역에 대한 유역평균강우량은 Thiessen법에 의해 제I보에서 구하였다.

나. 유효우량과 손실우량의 분리

본 분석에 있어서 손실우량은 제I보에서와 같이 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^{16,17}.

라. 비선형 불시변 유출수문곡선 모형(NL-TIM)의 매개변수 산정

전술한 비선형 불시변 유출수문곡선 모형의 식 (2)는 비선형 2계 미분방정식으로 여기에 포함되는 매개변수는 지수상수인 M 과 저류상수인 K_1 및 K_2 이다. 지수상수인 M 은 실측침투유량, Q_P 와 저류량, S_{Qb} 와의 회귀직선상의 기울기가 되며 이의 절편이 곧 K_1 이 된다. 따라서 구해진 N 과 K_1 값을 가지고 식 (4)에 의해 K_2 의 저류상수값을 구한다.

마. 비선형 시변 유출수문곡선(NLTVM)의 매개변수 산정

비선형 시변 유출수문곡선모형은 식 (7)과 식 (8)에서 보는 바와 같이 1계 및 2계 비선형 미분방정식으로 구성되었으며 지수상수 N_1 과 N_2 및 저류상수 K_1 과 K_2 의 4개 매개변수로 되어있다. 여기에서 N_1 과 K_1 은 직접유출수문곡선의 하강부에서 $Q(t)$ 와 $S(t)$ 의 관계직선에서 나타나는 기울기가 N_1 이고, 그 절편이 곧 K_1 이 된다. 이어서 $S(t) - K_1Q(t)^{M_1}$ 과 $\frac{dQ(t)}{dt}$ 의 관계직선에서 나타나는 기울기가 지수상수, N_2 이고 K_2 인 저류상수값은 식 (9)을 이용해서 구해질 수 있다. 단, 본 연구에서는 K_2 의 값이 시간에 따른 변수이기 때문에 계산의 간편을 위해서 그 평균의 K_2 값을 사용하였다.

바. 4개 유출수문곡선모형의 비교분석

제I보의 선형 불시변, 선형 시변 유출수문곡선모형과 본 분석에서 비선형 불시변, 비선형 시변 유출수문곡선 모형을 4개 모형에 의한 침투유량과 침투시간 및 직접유출수문곡선의 형상에 관한 비교 분석을 수행한다.

IV. 결과 및 고찰

1. 유역평균강우량

수계별 9개 유역에 대한 유역평균강우량은 Thiessen의 가중법을 사용하였으며, 다만 금강의 고은유역과 영산강의 입교유역은 각각 1개 강우관측소 밖에 없어 해당유역에서의 우량을 유역평균강우량으로 하여 분석하였다.^{17,18)}

2. 유효우량과 직접유출량의 유도

4개 수계 9개 유역에 대한 25개 호우사상으로 부터 유효우량과 직접유출량의 결과는 제I보의 Table-4와 같으며 전 유역에 걸친 유효우량과 직접유출량은 각각 3.31~93.07mm, 77.6~2,895.5m³/sec의 범위를 나타내고 있다.¹⁸⁾

3. 비선형 불시변 및 비선형 시변 유출수문곡선 모형의 매개변수 산정 및 보정

가. 비선형 불시변 유출수문곡선 모형의 매개변수 산정 및 보정

비선형 불시변 모형의 매개변수 산정은 전술한 분석방법에 의해 지수상수인 M 은 실측침투유량, Q_P 와 저류량, S_{Qb} 와의 회귀직선상의 기울기로서 구하였고 절편인 저류상수, K_1 이 산정되었다. 또한, 저류상수인 K_2 의 값은 식 (4)에 의해 구하였으며 모형의 보정은 선형 불시변 및 선형 시변 모형에서와 같이 시

Table-1. Calibrated parameters and initial conditions for Nonlinear, Time-Invariant Model

River System	Watershed	Occurrence period of rainfall event	M	K ₁	K ₂	Q ₀	dQ ₀ /dt
Han River	leemogjung	87. 6. 7. 09:00— 6. 8. 17:00	1.079	1.602	5.497	1.330	0.215
	Habanjung	87. 6. 7. 10:00— 6. 8. 20:00	1.079	1.212	4.601	0.447	0.896
	Jangpyung	87. 6. 7. 08:00— 6. 9. 05:00	1.079	1.330	3.978	0.046	0.009
	Maesan	74. 5.14. 06:00— 5.15. 07:00	1.028	2.163	6.039	0.400	0.100
		74. 7. 8. 20:00— 7.10. 04:00	1.028	1.621	4.015	5.000	9.700
Geum River	Tanbu	87. 6. 7. 16:00— 6. 8. 23:00	0.658	11.129	9.014	0.015	1.343
		73. 7. 2. 08:00— 7. 3. 06:00	0.901	2.910	5.500	1.000	2.700
	Koeun	73. 7.30. 04:00— 7.31. 05:00	0.901	2.473	3.090	0.400	0.600
Nag Dong River	Supyung	73. 7.30. 07:00— 7.31. 03:00	0.255	11.099	3.280	0.200	0.200
		74. 4. 7. 07:00— 4. 8. 18:00	0.255	78.050	5.417	1.100	1.600
		75. 4.26. 11:00— 4.27. 08:00	0.255	38.817	4.215	0.300	0.600
		75. 6.29. 18:00— 6.30. 11:00	0.255	12.106	1.420	35.40	7.000
Yeong San River	Hwasun	74.10. 1. 22:00—10. 2. 13:00	0.991	1.485	3.582	1.800	3.800
	Ipgyo	74. 6.17. 03:00— 6.17. 20:00	0.991	0.934	1.575	0.500	2.000
		75. 4.26. 13:00— 4.27. 12:00	0.991	1.369	1.824	0.800	0.200

M : Exponential constant

K₁ : The first storage constant K₂ : The second storage constant

Q₀ : Initial value of runoff discharge(m³/s)

dQ₀/dt : The derivative of initial runoff discharge with respect to time

행착오법을 적용하였다. 먼저 구해진 지수상수인 M을 고정하고 구해진 저류상수 K₁과 K₂의 값을 초기치로 하여 모형에 의한 침투유량과 침투시간이 실측 수문곡선의 침투유량 및 실측 침투시간에 근접될 수 있는 K₁ 및 K₂ 값을 시행착오법에 의해 이끌어냈으며 초기유량, Q₀와 이의 단위시간당 변화율, $\frac{dQ_0}{dt}$ 에 대한 결과는 Table-1과 같다. Table-1에서 보는 바와 같이 M, K₁, K₂, Q₀ 및 $\frac{dQ_0}{dt}$ 의 값은 각각 0.255~1.079, 0.934~78.050, 1.420~9.014, 0.015~35.4, 및 0.009~9.7의 범위를 나타내고 있다.

나. 비선형 시변 유출수문곡선 모형의 매개변수 산정 및 보정
비선형 시변 모형의 매개변수는 지수상수인

N₁과 N₂ 및 저류상수인 K₁과 K₂의 4개로서 매개변수의 산정은 분석방법 마항에서 제시된 방법에 의해 각 유역별 호우사상에 따라 구하여졌다. 그리고, 이 모형의 보정 역시 시행착오법에 의해 구해진 지수상수인 N₁ 및 K₁을 초기치로 하여 모형에 의한 침투유량과 침투시간이 실측 수문곡선의 침투유량 및 실측 침투시간에 근접될 수 있는 N₂ 및 K₂의 값을 이끌어냈으며 초기유량, Q₀와 이의 단위시간당 변화율, $\frac{dQ_0}{dt}$ 에 대한 결과는 Table-2와 같다. 여기에서 N₁, N₂, K₁ 및 K₂의 값은 각각 1.178~2.224, 0.045~3.289, 0.060~2.850, 1.133~224.75의 범위를 보여주고 있으며 초기유량, Q₀와 이의 단위시간당 변화율, $\frac{dQ_0}{dt}$ 는 비선형 불시변 유출수문곡선 모형의 것과 같기 때문에 동일한 값의 범위를 나타내고 있다.

Table-2. Calibrated parameters and initial conditions for Nonlinear, Time-variant Model

River System	Watershed	Occurrence period of rainfall event	N_1	N_2	K_1	K_2	Q_0	dQ_0/dt	
Han River	leemogjung	87. 6. 7. 09:00- 6. 8. 17:00	1.894	1.147	0.060	17.722	1.330	0.215	
	Habanjung	87. 6. 7. 10:00- 6. 8. 20:00	1.391	3.289	2.850	1.258	0.447	0.896	
	Jangpyung	87. 6. 7. 08:00- 6. 9. 05:00	1.669	0.941	1.040	25.786	0.046	0.009	
	Maesan		74. 5.14. 06:00- 5.15. 07:00	1.811	0.513	0.250	112.945	0.400	0.100
			74. 7. 8. 20:00- 7.10. 04:00	1.270	0.897	1.060	113.766	5.000	9.700
		75. 8. 6. 06:00- 6. 8. 23:00	1.689	0.980	0.250	3.710	3.300	5.200	
Geum River	Tanbu	87. 6. 7. 16:00- 6. 8. 23:00	1.503	0.283	1.210	224.752	0.015	1.343	
	Koeun		73. 7. 2. 08:00- 7. 3. 06:00	1.228	0.019	2.100	153.200	1.000	2.700
			73. 7.30. 04:00- 7.31. 05:00	1.648	0.642	1.580	6.209	0.400	0.600
Nag Dong River	Supyung	73. 7.30. 07:00- 7.31. 03:00	1.707	1.629	1.010	38.896	0.200	0.200	
		74. 4. 7. 07:00- 4. 8. 18:00	1.639	1.504	1.05	20.706	1.100	1.600	
		75. 4.26. 11:00- 4.27. 08:00	2.224	0.045	0.090	198.843	0.300	0.600	
		75. 6.29. 18:00- 6.30. 11:00	1.688	0.680	0.680	1.133	35.40	7.000	
Yeong San River	Hwasun	74.10. 1. 22:00-10. 2. 13:00	1.642	2.234	0.300	3.296	1.800	3.800	
	Ipgyo		74. 6.17. 03:00- 6.17. 20:00	1.850	0.781	0.070	34.116	0.500	2.200
			75. 4.26. 13:00- 4.27. 12:00	1.178	1.059	1.195	10.175	0.800	0.200

N_1 : The first exponential constant K_1 : The first storage constant
 N_2 : The second exponential constant K_2 : The second storage constant

4. 보정된 모형별 모의결과치와 실측치와의 비교

가. 비선형 불시변 및 비선형 시변 유출수 문곡선 모형의 침투유량과 침투시간의 비교 분석

비선형 불시변 모형(NLTIM)과 비선형 시변 모형(NLTVM)의 모의 침투유량과 모의 침투시간을 실측 침투유량 및 실측 침투시간과 비교한 결과는 Table-3과 같고 이의 결과를 분포도로 나타낸 결과는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. Table-3의 결과를 보면 먼저, 비선형 불시변 모형과 비선형 시변 모형에 의한 모의 침투유량이 각각 10.1~247.8, 11.5~274.6m³/s의 범위를 나타냈으며 이에 관한 평균오차를 보더라도 실측 침투유량에 대한 비선형 불시변 모형의 것이 5.37%임에 비추어 비선형 시변 모형의 것은 11.35%에 이르고 있다. 또한 침투시간에 있어서는 비선형 불시변 모형과 비선형 시변 모형의 침투시간이 각각 2.0

~15.0, 2.0~17.0hrs의 범위로서 모형별 침투시간의 실측 침투시간에 대한 오차분석을 시도한 바 침투유량의 결과와는 달리 실측 침투시간에 대한 비선형 불시변 모형의 평균오차가 47.49%로서 비선형 시변 모형의 평균오차 33.54%보다 다소 높은 결과를 보여주고 있다. 이 같은 사실은 모의된 침투유량과 침투시간의 실측치에 대한 산포도, Fig. 3과 Fig. 4를 보더라도 상기의 결과를 뒷받침 해주고 있다.

여기에 더해서 실측 침투유량과 침투시간을 제I보에 사용된 선형 불시변 및 선형 시변의 2개 모형과 본 분석에서 사용된 2개 모형에 의한 침투유량과 침투시간과의 상관분석을 시행한 결과 Table-4에서 보는 바와 같이 4개의 모형에 의한 침투유량과 침투시간이 공히 고도의 상관성이 인정되었으며 본 분석에서 사용된 비선형 시변 모형과 비선형 불시변 모형간의 침투유량과 침투시간의 비교에 있어서는 비선형 불시변 모형의 것이 비선형 시변 모형의 것에 비해 다소 높은 상관성을 보여주고

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

River System	Water-shed	Occurrence period of rainfall event	$Q_P(m^3/s)$				$RE(\%)$		$T_P(hrs)$			$RE(\%)$	
			Obs.	NLTIM	NLTVM	NLTIM	NLTVM	Obs.	NLTIM	NLTVM	NLTIM	NLTVM	
Han River	leem-ogjung	1. '87.6. 7. 09:00 - 6. 8. 17:00	27.4	26.5	33.1	3.28	20.80	6.0	11.0	7.0	83.33	16.67	
	Haba-njung	1. '87.6. 7. 10:00 - 6. 8. 20:00	23.9	26.5	25.2	10.88	5.44	8.0	11.0	7.0	37.5	12.5	
	Jang-pyung	1. '87.6. 7. 08:00 - 6. 9. 05:00	60.6	65.7	58.1	8.42	4.13	8.0	12.0	5.0	50.0	37.5	
	Maesan	1. '74.5.14. 06:00 - 5.15. 07:00	59.6	60.8	50.6	2.01	15.10	12.0	15.0	10.0	25.0	16.67	
		2. '74.7. 8. 20:00 - 7.10. 04:00	246.5	247.8	274.6	0.53	11.39	13.0	15.0	17.0	15.38	30.77	
		3. '75.8. 6. 06:00 - 8. 7. 11:00	26.9	28.6	24.6	6.32	8.55	6.0	10.0	10.0	66.67	66.67	
Geum River	Tanbu	1. '87.6. 7. 16:00 - 6. 8. 23:00	42.4	44.6	47.2	5.19	11.32	11.0	15.0	11.0	36.36	0.00	
	Koeun	1. '73.7. 2. 08:00 - 7. 3. 06:00	35.9	33.2	40.6	7.52	13.09	4.0	9.0	6.0	125.0	50.0	
		2. '73.7.30. 04:00 - 7.31. 05:00	10.8	10.1	11.5	6.48	6.48	6.0	9.0	2.0	50.0	66.66	
Nag Dong River	Supy-ung	1. '73.7.30. 07:00 - 7.31. 03:00	13.7	13.6	12.7	0.73	7.29	5.0	9.0	2.0	80.0	60.0	
		2. '74.4. 7. 07:00 - 4. 8. 18:00	28.5	31.2	32.6	9.47	14.38	10.0	15.0	12.0	50.0	20.0	
		3. '75.4.26. 11:00 - 4.27. 08:00	23.9	27.7	28.8	15.89	20.50	7.0	11.0	11.0	57.14	57.14	
		4. '75.6.29. 18:00 - 6.30. 11:00	42.4	44.8	49.8	5.66	17.45	2.0	2.0	2.0	0.00	0.00	
Yeong San River	Hwasun	1. '74.10.1. 22:00 -10. 2. 13:00	38.0	38.8	39.5	2.10	3.95	5.0	8.0	9.0	60.0	80.0	
	Ipgyo	1. '74.6.17. 03:00 - 6.17. 20:00	111.5	112.8	100.3	1.17	10.04	8.0	9.0	8.0	12.5	0.00	
		2. '75.4.26. 13:00 - 4.27. 12:00	210.0	211.5	235.7	0.28	11.76	9.0	10.0	7.0	11.11	22.22	
Mean						5.37	11.35				47.49	33.54	

NLTIM : Nonlinear Time-Invariant Model

NLTVM : Nonlinear Time-Variant Model

Q_P : Peak discharge

T_P : Time to peak

Obs : Observed discharge

RE : Relative Error

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

Model	Correlation coefficient		Remarks
	$Q_p(m^3/s)$	$T_p(hrs)$	
NLTIM	0.998**	0.893**	The first report ⁽¹⁸⁾
NLTVM	0.995**	0.735**	
LTIM	0.978**	0.886**	
LTVM	0.999**	0.999**	

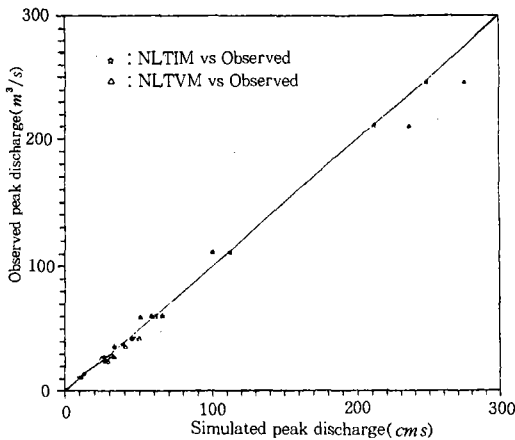


Fig. 3. Comparison of peak discharge by different models of applied watersheds

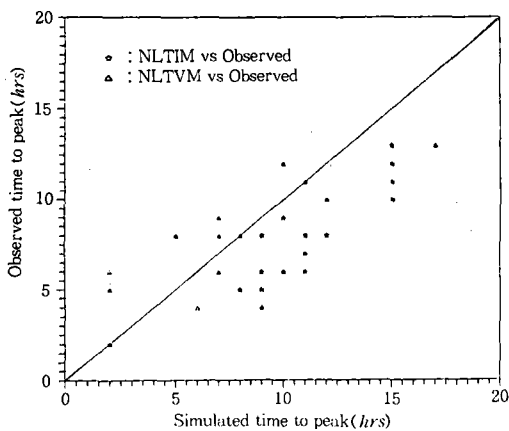


Fig. 4. Comparison of time to peak by different models of applied watersheds

있다. 이상에서 언급된 4개 모형의 상관분석 결과를 종합적으로 볼때 선형 시변 모형에 의한 첨두유량과 첨두시간이 타 모형의 것에 비해 높은 상관성을 나타내었다.

나. 모형별 유출수문곡선형상의 비교분석

대상유역인 한강, 금강, 낙동강 및 영산강 수계의 9개유역에 대한 16개 호우사상의 실측유출수문곡선과 보정된 모형별 유출수문곡선을 구하였으며 이의 예로서 한강의 이목정, 금강의 탄부, 낙동강의 수평 및 영산강의 입교유역의 각 1개 호우사상에 대한 실측 유출수문곡선과 제1보의 선형 불시변, 선형 시변 유출수문곡선과 본보의 비선형 불시변, 비선형 시변 모형에 의한 유출수문곡선을 나타낸 결과는 Fig. 5~Fig. 8과 같다. 예의 4개 유역에서는 물론이고 타 대상유역에서도 선형 시변 모형에 의한 유출수문곡선의 형상이 타모형의 것들에 비해 실측 유출수문곡선 형상에 훨씬 근접되었다.

5. 매개변수와 강우특성 및 유역특성과의 회귀분석

비선형 불시변 모형의 매개변수인 지수상

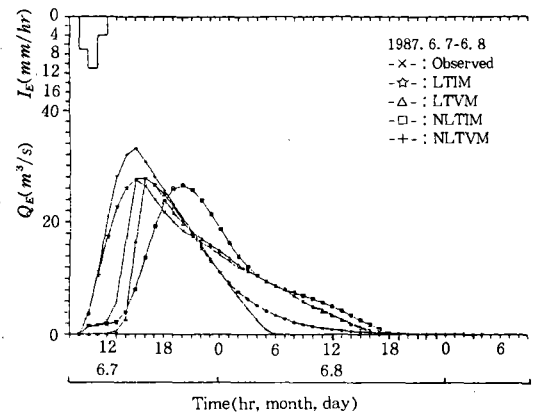


Fig. 5. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for calibration at Ieemokjung watershed of Han river

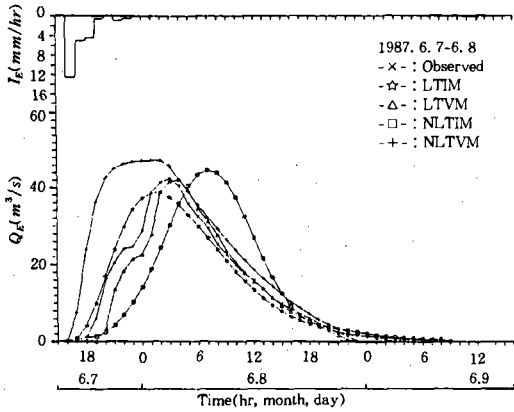


Fig. 6. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for calibration at Tanbu watershed of Geum river

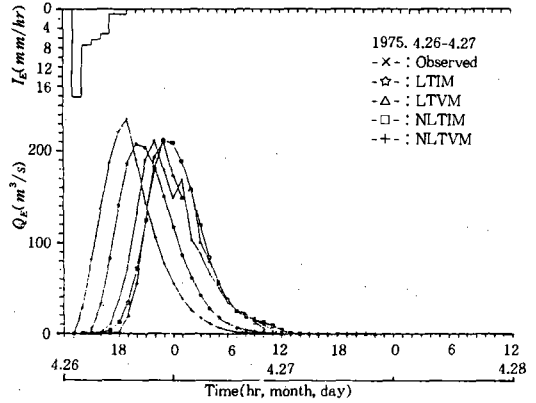


Fig. 8. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for calibration at Ipgyo watershed of Yeong San river

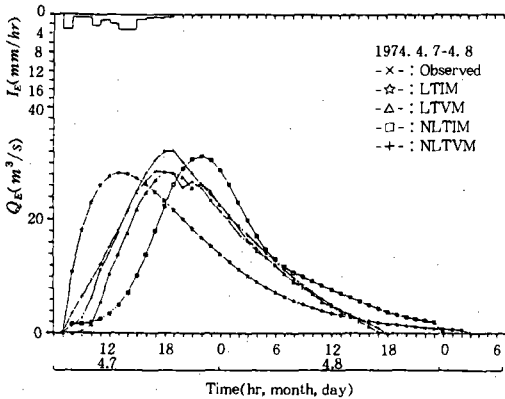


Fig. 7. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for calibration at Supyung watershed of Nag Dong river

수, M 과 저류상수, K_1 및 K_2 를 유역특성인 유역면적, A 와 본류연장, L 및 하천평균경사, S 그리고 강우특성인 잉여강우량, R_i 와 잉여강우 지속기간, D_r 과 관련시켜 중회귀관계를 구한 결과는 각각 식 (10)~식 (12)와 같으며 이들의 관계를 분산분석한 결과는 Table-5 ~ Table-7과 같다. 지수상수, M 과 유역특성과의 회귀관계에 대한 검정 결과는 Table-5에서 보는 바와 같이 유의성이 인정 되었으며

Table-5. Analysis of variance for exponential constant, M

Source	DF	Sum of squares	Mean square	F value	Prob > F
Model	3	3.443	1.148		
Error	13	4.243	0.326	3.516*	0.0461
Total	16	7.686			

저류상수, K_1 과 K_2 의 유역 및 강우특성과의 회귀관계는 Table-6 및 Table-7에서 보는 바와 같이 고도의 유의성이 인정되었다.

$$M = A^{-0.149} L^{0.447} S^{-0.489} \dots\dots\dots (10)$$

$$K_1 = A^{-0.939} L^{1.419} S^{0.652} \dots\dots\dots (11)$$

$$K_2 = A^{-0.769} L^{1.677} R_i^{-0.344} D_r^{0.554} \dots\dots\dots (12)$$

Table-6. Analysis of variance for storage constant, K_1

Source	DF	Sum of squares	Mean square	F value	Prob > F
Model	3	31.565	10.522		
Error	13	22.309	1.716	6.131*	0.0079
Total	16	53.874			

Table-9. Correlation analysis of simulated peak discharge and time to peak calculated by different models for verification

Model	Correlation coefficient		Remarks
	$Q_P(m^3/s)$	$T_P(hrs)$	
NLTIM	0.813*	0.766*	The first report ¹⁸⁾
NLTVM	0.939**	0.928**	
LTIM	0.998**	0.899**	
LTVM	0.999**	0.999**	

분석에서 사용된 2개 모형만을 비교해 보면 비선형 시변 모형은 첨두유량과 첨두시간 공히 고도의 유의성이 인정되나 비선형 불시변 모형의 것은 유의성만이 인정되므로서 비선형 시변 모형의 첨두유량과 첨두시간의 검정 결과가 비선형 불시변 모형에 비해 양호함을 보여 주고 있다. 이상의 검정 결과를 종합적으로 비교해 볼때 선형 시변 모형에 의한 첨두유량과 첨두시간이 타모형의 것에 비해 다소 높은 상관성을 나타내었다.

나. 모형별 유출수문곡선 형상 비교

모형별 유출수문곡선 형상의 검정을 위해 한강, 금강, 낙동강 및 영산강 수계의 7개유역

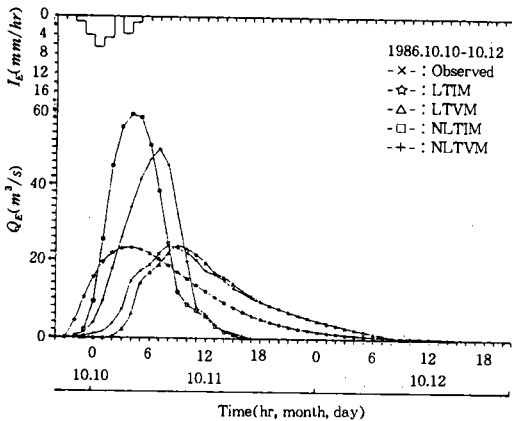


Fig. 9. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for verification at Ieemokjung watershed of Han river

에 대한 7개 호우사상의 실측 유출수문곡선과 모형별로 검정된 유출수문곡선을 구하였으며 이에 관한 예로서 한강의 이목정, 금강의 탄부, 낙동강의 수평 및 영산강의 입교유역의 각 1개 호우사상에 대한 실측 수문곡선과 제I보의 선형 불시변, 선형 시변 모형과 본보의 비선형 불시변, 비선형 시변 모형에 의해 검정된 유출수문곡선을 나타낸 결과는 Fig. 9~Fig. 12와 같다. 이 결과에서 보면 4개 모형 중 선형 시변 모형에 의한 유출수문곡선 형상이 보정에서의 결과와 마찬가지로 실측 수문곡선 형상에 매우 근접됨을 보여주고 있다.

V. 종합고찰

보정된 선형 불시변, 선형 시변, 비선형 불시변 및 비선형 시변 모형에 의해 유도된 첨두유량 및 첨두시간의 상관분석 결과, 제1보의 Table-4와 본보의 Table-4 및 제1보의 Fig. 1, 2와 본보의 Fig. 3, 4 에서 보는 바와 같이 4개 모형 공히 고도의 유의성이 인정되었고 특히 이 중에서도 선형 시변 모형이 첨두유량 및 첨두시간에서 모두 상관계수가 0.999로서 가장 높은 상관성을 나타내었고 그

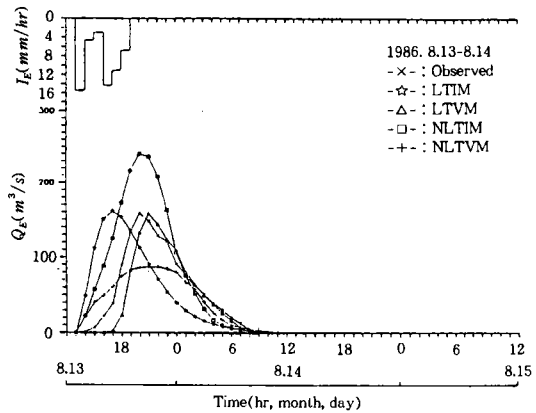


Fig. 10. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for verification at Tanbu watershed of Geum river

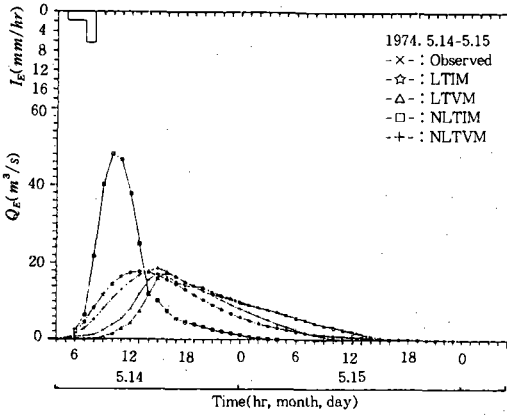


Fig. 11. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for verification at Supyung watershed of Nag Dong river

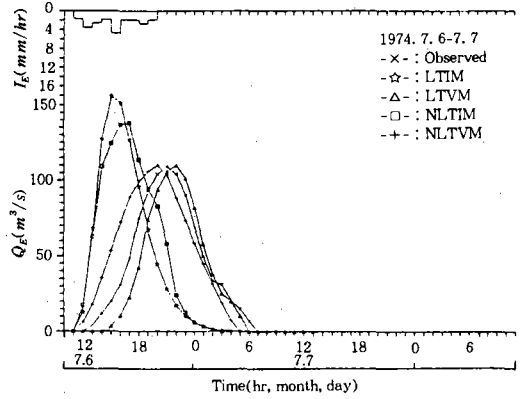


Fig. 12. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for verification at Ipgyo watershed of Yeong San river

다음으로는 비선형 불시변, 비선형 시변 및 선형 불시변의 순으로 나타났다. 유출수문곡선의 형상에 있어서는 보정 및 검증된 4개 모형의 모의된 유출수문곡선을 실측 유출수문곡선의 형상과 비교하면 Fig. 5~Fig 12에서 보는 바와 같이 선형 시변 모형에 의한 유출수문곡선 형상이 실측 수문곡선에 가장 근접되고 있음을 보여주고 있으며 그 다음으로는 선형 불시변이고 일반적으로 비선형 시변 및 비선형 불시변의 형상은 실측수문곡선 형상과 다소 동떨어진 결과를 보여주고 있다.

이상의 결과를 종합적으로 고찰해보면 4개 모형중 선형 시변 모형의 것이 타 모형에 비해 실측 수문곡선에 매우 근접한 가장 적정한 모형으로 나타났다는 사실이다. 이와 같은 결과는 대상유역에서 선형 시변 모형이 시간의 함수인 $K(t)$ 와 1계 미분방정식으로 구성된 모의 유출량식을 Runge-Kutta 수치해석법으로 구할 수 있는 단순성으로 인해 오히려 강수-유출의 복잡한 과정에서 유발될 수 있는 오차를 줄이는데 기여했기 때문이 아닌가 사료된다. 따라서, 이 모형의 신뢰도 확인을 위해서는 앞으로도 계속 광범위한 타 유역의 많은 호우사상 자료를 대상으로 분석 검토할 필

요가 있다고 생각된다. 또한 비선형 불시변 모형은 3개의 매개변수를 포함하는 2계 비선형 미분방정식으로서 이 모형의 해를 구하는데는 Runge-Kutta법을 이용하게 되며 이들 매개변수의 추정과정에서 다소의 오차가 발생하게 되면 전체적인 연산에 영향을 미쳐 오차를 가져올 수 있다. 이러한 사실이 곧 비선형 불시변 모형에서 추정된 결과가 선형 시변 모형의 것에 비해 다소 떨어진 결과를 가져온 것이 아닌가 사료된다.

마지막으로 비선형 시변 모형은 자연계의 강수-유출간의 수문과정에 접근된 이론을 바탕으로 분석되었기 때문에 좋은 결과를 기대했으나 본 분석의 결과에 있어서는 선형 시변 모형에 비해 뒤떨어졌다는 사실이다. 그 이유로서는 비선형 시변 모형이 4개의 매개변수로 구성되어있는데다 본 모형의 해석과정에서 유출수문곡선의 상승부까지는 2계 미분방정식으로, 감수부에서부터는 1계 미분방정식으로 해석해야만 하는 매우 복잡한 과정을 거쳐야 하는데 더해서 4개의 매개변수 추정시 한 매개변수의 추정이 타 매개변수에 계속 영향을 미치면서 오차가 나타날수 있다는 사실에 연유된 것으로 사료된다. 따라서, 앞으로 타유역의

많은 수문자료의 적용 및 검정과 함께 오차를 최대한 줄일 수 있는 비선형 시변 모형의 분석 방법과 검토가 심도있게 다루어져야 한다고 사료된다.

VI. 결 론

저수지를 위시한 농업수리구조물의 설계홍수량을 유도하기 위하여 유역면적이 작고 단기간 호우에 지역적으로 균일한 강우강도의 조건을 만족시켜주므로서 보다 정확한 유출수문곡선의 정립이 가능한 소유역을 대상으로, 4개의 유출수문곡선모형인 선형 불시변, 선형 시변, 비선형 불시변 및 비선형 시변 모형을 설정하고, 모형별 첨두유량과 첨두시간을 실측치와 비교 분석하므로서 적정 수문곡선모형을 제시하고자 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 선형 불시변, 선형 시변, 비선형 불시변 및 비선형 시변 유출수문곡선의 4개 모형을 위한 매개 변수를 구한 후 시행착오법에 의해 보정하였고 선형 불시변 및 비선형 불시변 모형의 매개 변수와 강우특성 및 유역특성과의 중회귀관계를 유도하였다.

2. 보정된 모형별 모의 첨두유량의 실측 첨두유량에 대한 상관분석을 시도한 결과 4개 모형 공히 고도의 유의성이 인정되었으며 특히 이중에는 선형 시변 모형의 상관계수가 0.999로서 가장 높은 상관성을 나타내었고 그 다음으로는 비선형 불시변, 비선형 시변 및 선형 불시변의 순으로 나타났다.

3. 보정된 모형별 첨두시간의 실측 첨두시간에 대한 상관분석에 있어서도 역시 선형 시변 모형의 상관계수가 0.999로서 가장 높은 유의성이 인정되었다.

4. 검정된 모형별 첨두유량과 첨두시간을 비교 분석한 결과 4개 모형중 선형 시변 모형의 것이 실측 첨두유량과 실측 첨두시간에 가

장 근접되는 좋은 결과를 나타내었다.

5. 보정 및 검정된 4개 모형의 유출수문곡선 형상을 실측 수문곡선과 비교한 결과 전체 대상유역에 걸쳐 선형 시변 모형의 것이 실측 수문곡선에 가장 근접되는 좋은 결과를 나타내었다.

6. 자연계의 유출수문과정에 비교적 접근된 이론을 바탕으로 한 비선형 시변 모형의 결과가 별로 좋지 못했다는 사실에 비추어 앞으로 타 유역의 많은 수문자료에 의한 검정과 함께 복잡한 해석과정에 따른 오차발생을 줄일 수 있는 분석방법과 검토가 뒤따라야만 한다고 사료된다.

본 논문은 '94~'95년도 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.9-18~48, 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. 건설부 ; 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서, pp. 6-1~6-86, 1994. 12.
 16. Linsley, R. K. and Others ; Hydrology for Engineers, pp. 193-243, McGraw Hill Book Co., Inc., 1958.
 17. 이순혁 ; 한국 주요수계의 소유역에 대한 순간단위도 유도에 관한 연구, 서울대 농학박사학위논문, pp. 11-29, 1977.
 18. 이순혁, 박명근, 맹승진 ; 농업수리구조물의 적정설계홍수량 유도를 위한 유출수문곡선모형의개발(I), 한국농공학회지 제37권 제3·4호, pp. 34-47, 1995.
 19. Nash, J. E. ; The Form of the Instantaneous Unit Hydrograph, Hyd. Res. Station, England, pp. 114-121, 1957.
 20. Nash, J. E. ; Determining Runoff from Rainfall, Ins. of C. E., Vol. No. 6282, pp. 165-183, 1958.
 21. Nash, J. E. ; A Linear Transformation of a Discharge Record, IAHR, 9th Convention, Belgrade, pp. III/13-1~III/13-2, 1961.
 22. 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.
 23. Snyder, F. F. ; Synthetic Unit Graphs, Trans. of Ame. Geophys. Union, Vol. 19. pp. 447-452, 1938.
 24. Soil Conservation Service ; Hydrology Section 4, pp. 15-1~15-16. 16-1~16
 25. U. S. Dept. of Agriculture, 1971.
 26. 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.
 27. Wu, I. P. ; Hydrological Data and Peak Discharge Determination of Small Hawaiian Watersheds, W. R. R. C, U. O. H., Tech. Report. No. 15, pp. 35-66, 1967.
 28. Yevjevich, V. M. ; Research Data Assembly for Small Watersheds Floods, Part II, Colorado Univ., Experiment Station, CER 67~68-13, pp. 1-50, 1967.

(접수일자 : 1996년 4월 16일)