

유출수문곡선모형의 비교 연구(I)

이 순혁*, 박 명근**, 맹 승진***

1. 서 론

우리나라는 국토의 68%가 산지인데다가 지세가 급준하고 상류수원지대의 임상상태가 불량하여 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 피해를 연례행사처럼 나타나고 있음은 주지의 사실이다.

이러한 홍수로 부터 유발되는 각종 농업수리구조물의 파괴에 의한 위험도를 제거하고 안정성 있는 농업용수공급을 위해서는 보다 정확한 유출수문곡선모형의 개발에 의한 침투홍수량의 제시가 우선적으로 제시되어야만 한다.

이에, 본 연구에서는 유역에서의 강우-유출해석과 비교 및 예측을 위해 우리나라 주요수계인 한강, 금강, 낙동강 및 연산강의 상류 9개 유역(55.9 - 140.7 Km^2)을 대상으로 되도록 단시간의 호우와 균일한 강우강도의 호우사상을 택하였으며 유출수문곡선 모형은 일차적으로 선형불시변 및 선형시변 2개의 모형을 택하고 이들 모형에 대한 침투유량과 침투유량도달시간 및 유출수문곡선형상을 실측치와 비교분석 하였다.

2. 수문자료

2.1 대상유역선정과 유역특성 및 수위-유량관측자료

본 분석에 사용된 대상유역은 한국의 주요수계인 한강, 금강, 낙동강 및 영산강의 9개 유역을 대상으로 하였다. 본 분석 대상유역의 유역특성으로 유역면적은 55.9 - 140.7 Km^2 이고 본류연장, 하천중심장, 유역경사, 유역평균폭 및 형상계수는 각각 16.55 - 25.95Km, 6.85 - 14.3Km, 2.66 - 17.41 m/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.

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

2.2 강우량자료

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

3. 결과 및 고찰

3.1 유역평균강우량

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

3.2 유효우량과 직접유출량의 유도

4개 수계 9개 유역에 대한 25개 호우사상으로부터 유효우량과 직접유출량의 결과를 구하였으며 전 대상유역에 걸친 유효우량과 직접유출량은 각각 3.31 - 93.07 mm, 77.6 - 2895.5 m³/sec의 범위를 나타내고 있다.

3.3 선형불시변 및 선형시변 유출수문곡선모형의 매개변수 보정

일반적으로 수문모형의 보정기법은 시행착오법과 수학적보정(일명 자동보정) 등으로 나뉘어진다. 이에 본 연구에서는 선형불시변과 선형시변 2개 모형의 매개변수가 1 - 2개의 작은 수 임을 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 첨두유량과 실측수문곡선의 형상 및 첨두유량에 비교적 잘 접근될 수 있는 적정 매개변수, K 값을 구하였으며 그 결과는 Table 1과 같다. 여기에서 전체 대상유역에서의 감마함수인자, N과 저류상수, K의 값은 각각 1.28 - 8.05 및 1.2 - 6.42의 범위를 나타내었다. 한편, 선형시변모형에 있어서는 보정하고자 하는 K(t)가 시변매개변수로서 각 사상별로 구해진 K(t) 값을 초기치로 하여 선형시변모형에 의한 수문곡선의 모의첨두유량과 실측수문곡선의 첨두유량이 잘 일치되는 최적매개변수, K(t) 치를 구하였다.

Table 1. 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	Jeomokjung	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 2. '74. 7. 8.20:00- 7.10.04:00 3. '75. 8. 6.06:00- 8. 7.11:00	112.0	8.05 3.96 1.88	1.51 3.96 5.96	5575.321 3.675 0.955	1.819 9.307 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 2. '73. 7.30.04:00- 7.31.05:00	85.3	2.31 3.79	2.65 2.09	1.174 4.638	1.148 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. 4.25.11:00- 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
Ipeyo	Ipeyo	1. '74. 6.17.03:00-10.17.20:00	140.7	4.2	1.3	7.757	1.698
		2. '75. 4.25.13:00- 4.27.12:00		7.11	1.2	1885.53	4.028

3.4 보정된 모형별 모의결과치와 실측치와의 비교

3.4.1 침투유량 및 침투유량도달시간의 비교 분석

선형불시변(LTIM) 및 선형시변유출수문곡선모형(LTVM)의 모의침투유량을 실측침투유량과 비교하고 선형불시변 및 선형시변 유출수문곡선모형에 의한 침투유량도달시간을 실측침투유량도달시간과 비교한 결과는 Table 2와 같다. 그리고 선형시변모형과 선형불시변모형에 의한 모의침투유량이 각각 10.86 - 246.12, 10.75 - 209.01 m³/sec 로 선형시변모형의 것이 실측침투유량의 10.8 - 246.5 m³/sec 에 훨씬 접근되는 좋은 결과를 보여주고 있으며 선형시변모형과 선형불시변모형의 침투유량도달시간은 각각 3.0 - 14.0, 1.0 - 10.7 hrs의 범위로서 이 역시 선형시변모형의 것이 실측침투유량도달시간, 2.0 - 13.0 hrs 에 매우 근접한 좋은 결과를 나타내고 있다. 따라서, 실측침투유량에 대한 선형시변모형에 의거한 모의침투유량의 평균오차는 0.75%로서 선형불시변모형에 의한 모의침투유량의 평균오차, 5.42%에 비해 훨씬 높은 접근도를 나타내고 있으며 또한 모형별 침투유량도달시간의 실측침투유량도달시간에 대한 오차분석을 시도한 결과 실측침투유량도달시간에 대한 선형시변모형에 의한 침투유량도달시간의 평균오차는 16.44%로서 선형불시변모형에 의거한 19.89%에 비해 좋은 결과를 보여주고 있다. 이에 더해서 모형별 모의침투유량과 실측침투유량과의 상관성분석 및 모형별 침투유량도달시간과 실측침투유량도달시간과의 상관성분석을 시도한 결과 Table 3에서 보는 바와 같이 2개 모형에 의한 침투유량과 침투유량도달시간이 공히 고도의 유의성이 인정되었으며 특히 선형시변모형에 의한 모의침투유량과 침투유량도달시간의 상관계수는 0.999로서 선형불시변모형의 모의침투유량과 침투유량도달시간의 상관계수 0.978과 0.886 보다 다소 높은 고도의 유의성이 인정되었다.

Table 2. 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	Jeemokjung1.	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		
	Habanjung1.	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		
	Jangpyung1.	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		
Geum River	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		
Nag Dong River	Suppyung	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		
Yeong San 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		
		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															

Obs. : Observed, LTIM : Linear Time invariant Model
 RE : Relative Error LTVE : Linear Time Variant Model

Table 3. 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**

3.4.2 유출수문곡선형상의 비교 분석

대상유역인 한강, 금강, 낙동강 및 영산강수계의 9개 유역에 대한 16개 호우사상의 실측유출수문곡선과 보정된 모형별 유출수문곡선을 구하였으며 이의 예로서 한강의 이목정, 금강의 탄부 호우사상에 대한 실측유출수문곡선과 선형불시변 및 선형시변모형의 유출수문곡선을 나타낸 결과는 Fig. 1 - Fig. 2와 같다. 예의 2개 유역을 포함한 전 대상유역에 걸쳐서 선형시변모형에 의한 유출수문곡선의 형상이 선형불시변모형의 것에 비해 실측유출수문곡선형상에 매우 근접됨을 보여 주고 있다.

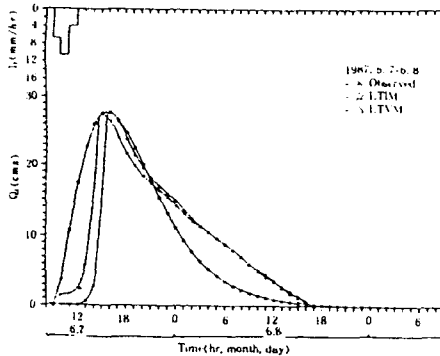


Fig. 1. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for calibration at Ieemokjung watershed of Han river

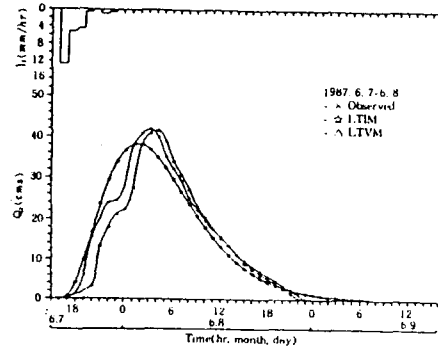


Fig. 2. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for calibration at Tanbu watershed of Geum river

3.5. 매개변수와 유역특성과의 회귀분석

선형불시변모형의 매개변수인 저류상수, K와 감마함수인자, N에 대해 유역특성과의 회귀관계를 분석한 결과 K 와 N은 각각 유역특성인 유역면적, 본류연장, 하천중심장 및 하천평균경사를 포함하는 다음의 식(1) 및 식(2)와 같은 회귀관계를 나타내었다.

$$K = 0.419 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right) \quad (r=0.88^{**}) \quad (1)$$

$$N = A^{0.713} L^{-0.343} L_{ca}^{-0.4} S^{-0.064} \quad (r=0.98^{**}) \quad (2)$$

여기에서 A는 유역면적, L은 본류연장, L_{ca}는 하천중심장, S는 하천평균경사를 나타낸다.

3.6 모형의 검증

3.6.1 침투유량 및 침투유량도달시간의 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 해당구역의 보정된 값을 이용하였으며 각 모형에 의한 침투유량과 침투유량도달시간으로 검증하였고 검증방법은 매개변수 보정시와 동일하게 상대오차와 상관관계로 비교하였다. Table 4는 모의침투유량과 실측침투유량간의 호우사상별 상대오차를 분석한 결과이며 침투유량에 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 나타내었으며, 침투유량도달시간에 대해 검증된 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 검증을 시도한 결과 Table 5에서 보는 바와 같이 침투유량은 선형불시변모형이 상관계수 0.998, 선형시변모형이 0.999이고 보정시는 각각 0.978 과 0.999 로서 모두 고도의 유의성을 나타내었고 침투유량도달시간 역시 선형불시변모형이 상관계수 0.899, 선형시변모형이 0.999로서 보정시의 0.886 과 0.999 와 함께 고도의 유의성을 보임으로서 전반적으로 볼때 침투유량 및 침투유량도달시간의 검증 결과가 양호함을 알수 있다.

Table 4. 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	LTIM LTVM	Obs.	LTIM LTVM LTIM LTVM	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			
	Ipyo	'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

Table 5. 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**

3.6.2 유출수문곡선형상의 비교 분석

대상유역인 한강, 금강, 낙동강 및 영산강수계의 9개 유역에 대한 9개 호우사상의 실측유출수문곡선화 모형별 유출수문곡선을 구하였으며 이의 예로서 한강의 이북정, 금강의 탄부유역 호우사상에 대한 실측유출수문곡선과 선형불시변 및 선형시변모형의 유출수문곡선을 나타낸 결과는 Fig. 3 - Fig. 4와 같다. 이상의 결과를 종합해 보면 2개의 유출수문곡선모형 중 선형시변 유출수문곡선모형에 의해 모의된 첨두유량, 첨두유량도달시간 및 유출수문곡선형상이 선형불시변 유출수문곡선모형의 것에 비해 좋은 결과를 가져왔음을 볼 수 있다.

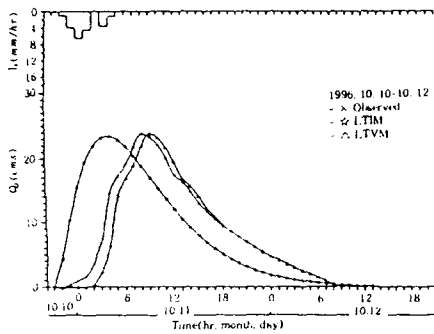


Fig. 3. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for verification at leemokjung watershed of Han river

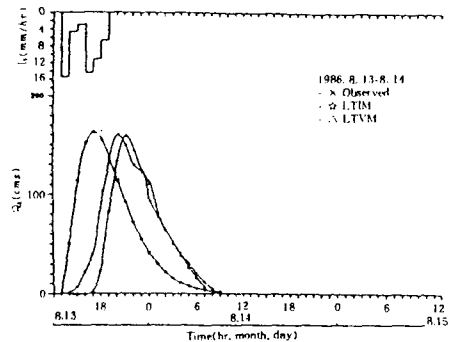


Fig. 4. Comparison of runoff hydrographs derived by different models for verification at Tanbu watershed of Geum river

4. 結 論

- 1) 보정된 모형별 모의된 첨두유량과 첨두유량도달시간을 실측치의 결과와 비교 분석을 수행한 결과 선형시변모형의 것이 다소 높은 유의성을 나타내었다.
- 2) 보정된 모형별 유출수문곡선의 형상은 전 대상유역에 걸쳐 선형시변모형에 의한 유출수문곡선이 선형시변모형의 것에 비해 실측치에 의한 유출수문곡선형상에 보다 근접됨을 보여주고 있다.
- 3) 첨두유량과 첨두유량도달시간에 관한 2개 모형의 검정을 상대오차와 상관관계로서 비교 분석한 결과 2개 모형 공히 보정시와 같은 고도의 유의성을 나타내므로써 검정결과가 양호함을 보여주고 있다.

4) 이상에서 얻어진 결과들은 2차적으로 연구되는 비선형불시변 및 비선형시변모형에 의한 결과와 비교분석할 예정이다.

5. 참고문헌

- 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.
- 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.
- 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.
- 10) 건설부 ; 한국의 홍수, pp.43-89, 1967 - 1969.
- 11) 건설부 ; 한국의 홍수, pp. 9-105, 1973.
- 12) 건설부, 산업기지기개발공사 ; 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) 이순혁 ; 한국 주요수계의 소유역에 대한 순간단위도 유도에 관한 연구, 서울대 농학박사 학위논문, pp. 11-29, 1977.
- 16) Nash, J.E. ; The Form of the Instantaneous Unit Hydrograph, Hyd. Res. Station, England, pp. 114-121, 1957.
- 17) Nash, J.E. ; Determining Runoff from Rainfall, Ins. of C.E., Vol. No. 6282, pp. 165-183, 1958.
- 18) Nash, J.E. ; A Linear Transformation of a Discharge Record, IAHR, 9th Convention, Belgrade, pp. III/13-1 ~ III/13-2, 1961.
- 19) Snyder, F.F. ; Synthetic Unit Graphs, Trans. of Ame. Geophys. Union, Vol. 19. pp. 447-452, 1938.
- 20) 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.