

월유출량의 모의발생에 관한 비교 연구

Comparative Studies on the Simulation for the Monthly Runoff

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

Summary

This study was conducted to simulate long series of synthetic monthly flows by multi-season first order Markov model with selection of best fitting frequency distribution, harmonic synthetic and harmonic regression models and to make a comparison of statistical parameters between observed and synthetic flows of five watersheds in Geum river system.

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

1. Both gamma and two parameter lognormal distributions were found to be suitable ones for monthly flows in all watersheds by Kolmogorov-Smirnov test.

2. It was found that arithmetic mean values of synthetic monthly flows simulated by multi-season first order Markov model with gamma distribution are much closer to the results of the observed data in comparison with those of the other models in the applied watersheds.

3. The coefficients of variation, index of fluctuation for monthly flows simulated by multi-season first order Markov model with gamma distribution are appeared closer to those of the observed data in comparison with those of the other models in Geum river system.

4. Synthetic monthly flows were simulated over 100 years by multi-season first order Markov model with gamma distribution which is acknowledged as a suitable simulation model in this study.

* 충북대학교 농업과학연구소

** 경북대학교 농과대학

*** 충북대학교 농과대학

키워드 : K-S Test, 다계절 1차 Markov 모의발생 모형, 조합성모형, 조합회귀모형, 모의발생 월유출량

I. 서 론

우리나라 농업의 생산성 제고를 위해서는 대단위 농업용수 개발계획과 안정성 있고 합리적인 수리구조물의 설계 및 시공이 중차대한 과제로 제시되고 있다. 그러나 우리나라는 아직까지도 각종 수공구조물의 안정성 있는 설계계획에 필수불가결한 장기연속유출량 자료가 확보되어 있지 않기 때문에 단기간 관측 자료에 의한 설계시공은 항상 수공구조물의 파괴위험도가 뒤따르게 되었으며 호우나 태풍의 내습에 의해 쉽사리 제방이나 저수지를 비롯한 각종 수공구조물의 범람 붕괴를 가져왔고, 이로 인해 막대한 재산과 인명의 피해를 연례행사처럼 겪어 오고 있는 실정에 놓여 있다.^{19,20)}

따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 추계학적인 모의발생기법에 의해 장기적으로 모의발생된 월유출량의 분석이 필요하며, 따라서 적절한 모의발생기법을 제시하는 것이 매우 중요하다고 사료 된다.

이에 본 연구에서는 금강수계의 5개 유역에 대한 월유출량자료를 대상으로 2변수 대수정규분포와 Gamma분포형에 대한 적합도 검정을 실시하여 적정확률분포형을 설정한 다음, 이들 적정분포형에 따른 다계절 1차 Markov 모형에 의해 합성된 모의발생치와 조화합성모형 및 조화회귀모형에 의해 합성된 모의발생치를 실측치와 비교 분석하므로써 적절한 월유출량의 모의발생모형을 제시하고 나아가 이에 의해 장기간에 걸친 월유출량 자료의 모의발생을 가능하게 하고자 한다. 이로서 저수지를 포함한 각종 수리구조물의 적정규모 결정과 함께 합리적인 운영을 기 할수 있게 될 것으로 기대 된다.

II. 추계학적 수문모형의 이론

1. 다계절 1차 Markov 모형

월유출량과 같이 1년을 몇 개의 시간간격으로 나누어 유량자료를 분석할 경우 통계치가 단일 값을 가지지 않을 경우에 적용하는 1차 Markov 모형을 다계절 1차 Markov 모형이라 하며 1년을 m 개의 상이한 계절로 구분하였을 경우 각 계절 유량에 Markov 모형을 적용할때 2개의 지수를 사용해서 특정유량 $q_{i,j}$ 를 표시하는데 첫번째 지수 i 는 년유량계열 중의 어떤 년에 속하는 유량인가를 표시하며 두번째 지수, j 는 1부터 m 까지 값을 가지는 계절 중 어떤 계절에 해당하는 유량인가를 표시하는 계절번호이다. j 계절유량과 $(j-1)$ 계절유량간에 1차 계열 상관계수 ρ_j 는 식 (1)과 같이 정의된다.^{9,37)}

$$\rho_j = \{E[(X_{i,j} - \mu_j)(X_{i,j-1} - \mu_{j-1})]\} / (\sigma_j \sigma_{j-1}) \dots \dots \dots (1)$$

여기서 $X_{i,j-1}$: i 년 j 계절유량

μ_j : 각 계절유량의 평균치

σ_j : j 계절유량의 표준편차

따라서 계절유량의 모의발생을 위한 다계절 1차 Markov 모형은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{i,j} = \mu_j + \frac{\rho_j \sigma_j}{\sigma_{j-1}} (q_{i,j-1} - \mu_{j-1}) + t_{i,j} \sigma_j \sqrt{(1 - \rho_j^2)} \dots \dots \dots (2)$$

여기서 $t_{i,j}$: 표준정규난수

실제로 어떤 지점에 대한 월유출량을 가지고 다계절 월유출량을 모의발생할 경우에는 실측된 월유출량이 어떤 확률분포형을 갖는냐에 따라 표준정규난수 $t_{i,j}$ 의 추정방법이 다르게 되므로 우선적으로 적정확률분포형을 선정

해야 한다.

따라서 본 분석에서는 다계절 1차 Markov 모형에 의해 월유량계열을 분석하기 위해 사용할 수 있는 분포형인 대수정규분포와 Gamma 분포에 따른 고찰을 수행기로 한다.

가. 2변수 대수정규분포를 갖는 유량계열

실측 월유출량 계열 $Q_{i,j}$ 가 2변수 대수정규 분포에 의해 정규화되는 경우에는 $q_{i,j} = \ln Q_{i,j}$ 로서 모의발생식에 포함되는 모든 변수를 대수변환된 유량계열인 $q_{i,j}$ 를 사용하여 계산한 후 식 (3)과 같은 모의발생식에 의해 장기간의 시계열 발생이 가능하게 된다.

$$q_{i,j} = \bar{q}_j + \frac{r_j S_{q_j}}{S_{q_{j-1}}} (q_{i,j-1} - \bar{q}_{j-1}) + t_{i,j} S_{q_j} \sqrt{(1 - \gamma_j^2)}$$

..... (3)

여기서

- \bar{q}_j, S_{q_j} : j월의 $q_{i,j}$ 의 평균치와 표준편차
- γ_j : j월과 (j-1)월의 $q_{i,j}$ 간의 1차 계열상관계수
- $t_{i,j}$: 표준정규난수

따라서 합성유량계열로서 최종적인 변환은 다음의 식 (4)에 의해 구해질 수 있다.

$$Q_{i,j} = \exp(q_{i,j}) \text{ (4)}$$

나. Gamma분포를 갖는 유량계열

실측 월유출량계열이 Gamma분포를 가질 경우의 평균치 \bar{Q}_j , 분산 S_j^2 및 1차 계열상관계수, γ_j 는 각각 식 (5)~식 (7)에 의해 계산할 수 있다.

$$\bar{Q}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{i,j} \text{ (5)}$$

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_{i,j} - \bar{Q}_j)^2 \text{ (6)}$$

$$r_j = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{i,j} \cdot Q_{i,j-1} - n \bar{Q}_j \cdot \bar{Q}_{j-1}}{(n-1) S_j \cdot S_{j-1}} \text{ (7)}$$

여기서 n : 유량시계열의 년수

$Q_{i,j}$: i년, j월의 유출량

또한 실측 월유출량의 왜곡도계수, g_j 는 다음의 식 (8)로부터 구해진다.

$$g_j = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{i,j}^3 - 3 S_j^2 \cdot \bar{Q}_j + \bar{Q}_j^3}{S_j^3} \text{ (8)}$$

그리고 j월분 무작위변량의 왜곡도계수, $g_{t,j}$ 는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$g_{t,j} = \frac{g_j - \gamma_{(j-1)}^3 \cdot g_{j-1}}{[1 - \gamma_{(j-1)}^2]^{1.5}} \text{ (9)}$$

여기서 Gamma분포의 난수, $t_{i,r,j}$ 는 표준정규난수를 $t_{i,j}$ 로 할때 다음의 식 (10)으로 구할 수 있다.

$$t_{i,r,j} = \frac{2}{g_{t,j}} \left[\left(1 + \frac{g_{t,j} \cdot t_{i,j}}{6} - \frac{g_{t,j}^2}{36} \right)^3 - 1 \right] \text{ (10)}$$

따라서, Gamma분포를 갖는 월유출량의 모의발생을 위한 일반식은 다음의 식 (11)과 같다.

$$Q_{i,j} = \bar{Q}_j + \frac{\gamma_j S_{q_j}}{S_{q_{j-1}}} (Q_{i,j-1} - \bar{Q}_{j-1}) + t_{i,r,j} \cdot S_{q_j} \sqrt{(1 - \gamma_j^2)}$$

..... (11)

2. 조화합성모형

실측월하천유량자료를 다음과 같이 배열한 후 월별 평균치 및 표준편차를 구한다.^{10,35)}

$$q_{1,1} \quad q_{1,2} \quad q_{1,3} \quad \dots \quad q_{1,12}$$

$q_{2,1}$	$q_{2,2}$	$q_{2,3}$	$q_{2,12}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$q_{i,1}$	$q_{i,2}$	$q_{i,3}$	$q_{i,12}$

평균치, $m_t, m_1 m_2 m_3 \dots m_{12}$
 표준편차, $S_t, S_1 S_2 S_3 \dots S_{12}$

여기서 $q_{i,j}$ 는 i 년 j 월 유출량
 구해진 평균치, m_t 의 값을 식 (12)의 조화 수, m_t^* 에 적용시킨다.

$$m_t^* = \hat{\alpha}_0 + \sum_{r=1}^p (\hat{\beta}_r \cdot \cos \frac{2\pi r t}{12} + \hat{\gamma}_r \cdot \sin \frac{2\pi r t}{12}) + \epsilon_t \quad (p < 5) \dots (12)$$

여기서, $\hat{\alpha}_0 = \sum_t \frac{m_t}{12}$

$$\hat{\beta}_1 = \left(\sum_t m_t \cos \frac{2\pi t}{12} \right) / 6$$

$$\hat{\beta}_2 = \left(\sum_t m_t \cos \frac{2\pi 2t}{12} \right) / 6$$

\vdots

$$\hat{\beta}_r = \left(\sum_t m_t \cos \frac{2\pi r t}{12} \right) / 6$$

$$\hat{\gamma}_1 = \left(\sum_t m_t \sin \frac{2\pi t}{12} \right) / 6$$

$$\hat{\gamma}_2 = \left(\sum_t m_t \sin \frac{2\pi 2t}{12} \right) / 6$$

\vdots

$$\hat{\gamma}_r = \left(\sum_t m_t \sin \frac{2\pi r t}{12} \right) / 6$$

ϵ_t : 무작위변수

위와 같은 과정에 의하여 표준편차 S_t 의 조화 수 S_t^* 역시 식 (13)과 같이 표시할 수 있다.

$$S_t^* = \hat{\alpha}_0' + \sum_{r=1}^p (\hat{\beta}_r' \cdot \cos \frac{2\pi r t}{12} + \hat{\gamma}_r' \cdot \sin \frac{2\pi r t}{12}) + \epsilon_t, \quad (p < 5) \dots (13)$$

여기서, $\hat{\alpha}_0' = \sum_t \frac{S_t}{12}$

$$\hat{\beta}_r' = \left(\sum_t S_t \cos \frac{2\pi r t}{12} \right) / 6$$

$$\hat{\gamma}_r' = \left(\sum_t S_t \sin \frac{2\pi r t}{12} \right) / 6$$

식 (12)와 식 (13)에 의해서 구해진 조화 수, m_t^* 와 S_t^* 를 사용하여 실측유량과 관련시킨 표준변량, Z_t 를 식 (14)에 의해 구할 수 있다.

$$Z_t = (q_t - m_t^*) / S_t^* \dots (14)$$

원활화 과정으로 인해 표준변량, Z_t 의 합이 영으로 되지 않기 때문에 일반적으로 계속적인 수정이 필수적이며 이러한 수정을 위해 표준변량, Z_t 의 평균치인 m_z 와 그 표준편차, S_z 를 계산하므로써 식 (15)와 같은 수정변량, W_t 가 구해진다.

$$W_t = (Z_t - m_z) / S_z \dots (15)$$

다음 W_t 의 지체1자기상관계수(Lag-one Autocorrelation Coefficient), ρ_1 을 다음의 식 (16)에 의해 구한다.

$$\rho_1 = \frac{C_1}{C_0} \dots (16)$$

여기서, $C_1 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-1} (W_t - \bar{W})(W_{t+1} - \bar{W})$

$$C_0 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (W_t - \bar{W})^2$$

이어서 잔차(Residual), $\epsilon(t)$ 를 식 (17)에 의거하여 계산한다.

$$\epsilon(t) = W_t - \rho_1 W_{t-1} \dots (17)$$

잔차의 평균치, ϵ_m 과 그 표준편차, ϵ_s 를 계산한 후 잔차수열 $E(t)$ 가 정규분포 (1, 0)에 만족되는 값을 구한 후 최종적으로 소기하는 모의발생을 위한 수정변량 W_t^* 를 식 (18)에 의해 구한다.

$$W_t^* = \rho_1 W_{t-1} + E(t) \dots\dots\dots (18)$$

또한 모의발생을 위한 표준변량 Z_t^* 는 식 (19)와 같이 정리될 수 있다.

$$Z_t^* = m_z + S_z W_t^* \dots\dots\dots (19)$$

따라서 조화합성모형에 의해 모의발생하고자 하는 일반식은 식 (20)과 같이 유도된다.

$$q_t^* = m_t^* + S_t^* Z_t^* \dots\dots\dots (20)$$

3. 조화회귀모형

어느 특정월에 관측된 각각의 유출량과 평균유출량간에 변화가 유의한 관계를 갖지 않는 경우에는 다음의 식 (21)과 같은 회귀모형식으로 단순화하여 월유출량을 모의발생시킬 수 있다.

$$y_t = \alpha + \beta_1 \cos 2\pi t / 12 + \gamma_1 \sin 2\pi t / 12 + \epsilon_t \quad (21)$$

여기에서 y_t 는 t 월의 유출량이며 α , β_1 및 γ_1 은 각각 실측월유출량으로 부터 구해지는 상수이다. 그리고 ϵ_t 는 다음과 같은 가정하에서의 임의 변량이다. 즉, 첫째로 통계특성의 평균이 영이고 분산이 1인, σ_ϵ^2 이어야 하며 둘째로 ϵ_t 는 ϵ_{t-k} ($k \neq 0$)와 상관되지 않는다. 즉, 상호 독립적이다.

따라서 상기 2개 가정하에 α , β_1 , γ_1 및 σ_ϵ^2 의 4개 상수 및 임의변량 추정치인 $\hat{\alpha}'$, $\hat{\beta}_1'$, $\hat{\gamma}_1'$ 및 $\hat{\sigma}_\epsilon^2$ 의 값이 최소자승법에 의해서 다음의 식

(22), (23), (24) 및 (25)에 의해 계산할 수 있다.

$$\hat{\alpha}' = \bar{y} = \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{N} \dots\dots\dots (22)$$

$$\hat{\beta}_1' = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N y_i \cos \frac{2\pi t}{12} \dots\dots\dots (23)$$

$$\hat{\gamma}_1' = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N y_i \sin \frac{2\pi t}{12} \dots\dots\dots (24)$$

$$\hat{\sigma}_\epsilon^2 = \left\{ \sum_{i=0}^N (y_i - \bar{y})^2 - (\hat{\beta}_1'^2 + \hat{\gamma}_1'^2) N / 2 \right\} / (N - 3) \dots\dots\dots (25)$$

서로 다른 년의 같은 달에 있어서 부분적으로 월유출량의 변화가 크게 되면 무작위 성분간의 분산이 매우 커지는 결과를 가져오기 때문에 이러한 문제를 해결하기 위해서는 월유출량에 대수를 취한 다음의 식 (26)을 취하므로써 해결될 수 있다.

$$\log y_t = \alpha + \beta_1 \cos 2\pi t / 12 + \gamma_1 \sin 2\pi t / 12 + \epsilon_t \dots\dots\dots (26)$$

III. 기본수문자료 및 분석 방법

1. 기본수문자료

본 연구의 대상유역으로는 금강수계의 용담, 금산, 옥천, 공주 및 규암 유역을 선정^{12,34)} 하였다. 이들 유역에 대한 유역특성은 Table-1과 같으며 여기에서 유역면적은 937~8273km²의 범위이고 주하천장은 12~338.1km, 평균 폭은 23.35~78.08km, 형상계수는 0.072~6.507의 범위를 나타내고 있다.

Table-1. Physical characteristics of the selected watersheds

River	Watershed	Area (km ²)	Length of main stream (km)	Average basin width (km)	Shape factor	Observed duration (yrs)	Location
Geum	Yongdam	937	12.0	78.08	6.507	27	Long. 127° 32' Lati. 35° 28'
	Geumsan	1628	35.6	45.73	1.285	27	Long. 127° 34' Lati. 36° 07'
	Ogcheon	2943	60.2	48.89	0.812	27	Long. 127° 39' Lati. 36° 16'
	Gongju	7126	305.2	23.35	0.077	27	Long. 127° 08' Lati. 36° 28'
	Gyuam	8273	338.1	24.47	0.072	27	Long. 126° 04' Lati. 36° 16'

2. 분석 방법

가. 대상유역별 월유출량 자료의 기본통계치 분석

다계절 1차 Markov 모형, 조화합성모형 및 조화회귀모형을 사용하여 월유출량의 모의발생을 시도하는데 기본적으로 필요한 기본통계치인 평균치(\bar{Q}_j), 표준편차(S_j), 왜곡도계수(C_s) 및 변동계수(C_v)을 전술한 식 (5), (6)과 다음의 식 (27) 및 (28)에 의해 유역별로 구하였다.

$$C_s = \frac{\frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n (Q_{i,j} - \bar{Q}_j)^3}{S_j^3} \dots (27)$$

$$C_v = \frac{\bar{Q}_j}{S_j} \dots (28)$$

나. 확률분포형의 적합도 검정

월유출량의 확률분포형으로는 일반적으로 적용되는 Gamma분포와 2변수 대수정규분포의 2개 분포형을 대상으로 그 적합도를 검정하였다. 유역별 적정확률분포형의 검정을 위해 본 분석에서는 비매개변수적 방법인 K-S (Kolmogorov-Smirnov) Test에 의해 적합도

를 판정하였다.¹⁸⁾

다. 통계특성치의 비교

Gamma분포형 및 2변수 대수정규분포형에 의해 모의발생된 월유출량과 조화합성모형 및 조화회귀모형의 모의발생방정식에 의해 모의발생된 월유출량의 통계특성치를 실측치의 통계특성치인 평균치, 표준편차 및 변동계수와 비교 분석하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 월유출량 자료의 기본통계치 분석

금강 수계에 대한 평균치, 표준편차, 왜곡도계수 및 변동계수의 기본통계치를 각 유역별로 구한 결과는 Table-2와 같다. Table-2에서 보는 바와 같이 금강의 5개 유역 전체에 걸쳐 표준편차, S_j 는 4.16~271.29, 왜곡도계수, C_s 와 변동계수, C_v 는 각각 -0.13~3.72 및 0.39~1.15의 범위를 나타내고 있다.

2. 확률분포에 대한 적합도 검정

분포형에 대한 적합도 검정은 비매개변수방법인 K-S방법을 이용하였으며 각 유역에 대

Table-2. Basic statistics of historic streamflow in Geum river

Water-shed	Statistics	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Yongdam	Q_j	6.93	12.70	19.23	27.76	18.55	22.46	76.93	45.09	37.74	11.98	11.52	9.12
	S_j	4.33	9.87	13.96	17.94	12.67	25.76	45.69	28.41	25.89	8.06	6.02	4.16
	C_s	1.24	1.84	1.40	1.68	0.80	1.97	0.09	0.44	0.73	2.22	0.73	0.62
	C_v	0.63	0.78	0.72	0.65	0.68	1.15	0.59	0.63	0.69	0.67	0.52	0.46
Geumsan	Q_j	10.41	19.17	31.92	46.66	31.50	39.17	129.13	77.27	61.81	18.0	18.30	14.44
	S_j	6.44	12.53	23.51	30.07	21.59	43.23	76.17	48.05	40.69	11.17	9.55	6.32
	C_s	1.58	1.07	1.61	1.64	0.83	2.03	0.06	0.45	0.68	0.94	0.70	0.67
	C_v	0.62	0.65	0.74	0.64	0.69	1.10	0.59	0.62	0.66	0.62	0.52	0.44
Ogcheon	Q_j	17.61	32.33	48.29	70.75	48.03	59.25	224.27	129.06	123.26	33.38	27.13	22.28
	S_j	10.11	25.31	37.55	50.99	32.33	66.67	138.79	85.87	104.75	31.22	13.81	9.89
	C_s	1.73	1.39	1.89	1.73	0.72	1.88	0.29	0.41	1.07	3.72	0.95	0.97
	C_v	0.57	0.78	0.78	0.72	0.67	1.13	0.62	0.67	0.85	0.94	0.51	0.44
Gongju	Q_j	41.02	68.39	93.47	143.3	104.62	124.52	420.25	294.79	272.32	83.34	65.64	54.33
	S_j	20.14	47.96	59.29	98.92	76.99	133.08	233.72	174.56	217.15	43.37	29.44	21.13
	C_s	1.74	1.16	1.24	1.50	0.96	1.80	-0.13	0.87	1.16	0.79	0.66	0.78
	C_v	0.49	0.70	0.63	0.69	0.74	1.07	0.56	0.59	0.80	0.52	0.45	0.39
Gyuam	Q_j	47.62	79.76	108.5	166.4	121.47	144.56	487.91	342.26	316.17	96.76	76.25	63.08
	S_j	23.38	55.37	68.84	114.9	89.40	154.52	271.29	202.68	252.12	50.35	34.24	24.54
	C_s	1.74	1.18	1.24	1.50	0.96	1.80	-0.13	0.87	1.16	0.78	0.66	0.78
	C_v	0.49	0.69	0.63	0.69	0.74	1.07	0.56	0.59	0.80	0.52	0.45	0.39

Q_j : Observed mean monthly discharge C_s : Coefficient of skewness
 S_j : Standard deviation C_v : Coefficient of variation

Table-3. Result of goodness of fit of probability distribution by Kolmogorov-Smirnov test in selected watersheds.

River	Water-sheds	$D_{0.05}$	$D_n(\text{Max})$			
			T.P.L.	Test	T.P.G.	Test
Geum	Yongdam	0.076	0.072	0	0.052	0
	Geumsan	0.076	0.071	0	0.050	0
	Ogcheon	0.076	0.072	0	0.059	0
	Gongju	0.076	0.052	0	0.057	0
	Gyuam	0.076	0.055	0	0.058	0

$D_n(\text{Max})$: Maximum deviation
 0 : Significance level can't be acknowledged

한 검정 결과는 Table-3과 같다.

Table-3에서 보는 바와 같이 K-S 검정 결과 대상유역 전체에 걸쳐 2변수 대수정규분포 및 Gamma분포의 적합도가 인정되었다. 따라

서 2변수 대수정규분포형과 Gamma분포형에 의한 월유출량을 모의발생하여 각각에 의한 통계특성치의 비교 분석을 수행한다.

3. 적정확률분포에 의한 다계절 1차 Markov 모형, 조화합성모형 및 조화회귀모형에 따른 모의발생식의 유도

가. 적정확률분포에 따른 다계절 1차 Markov 모형

적정확률분포형으로 검정된 대수정규분포와 Gamma분포에 따른 다계절 1차 Markov모형의 대상유역별 모의발생 초년도 2월분 모의발생식만을 표본 예로 나타낸 결과는 Table-4 및 Table-5와 같다.

Table-4. Simulation equations of February for the first year in the selected watersheds

Model	River	Water-sheds	Simulation equations
Sim(LN)	Geum	Yongdam	$q_{1,2} = 2.30 + (0.34 \times 0.70 / 0.61) \times (2.49 - 1.76) + t_{1,2} \times 0.70 \sqrt{1 - 0.34^2}$
		Geumsan	$q_{1,2} = 2.72 + (0.39 \times 0.75 / 0.57) \times (2.98 - 2.18) + t_{1,2} \times 0.75 \sqrt{1 - 0.39^2}$
		Ogcheon	$q_{1,2} = 3.17 + (0.41 \times 0.85 / 0.53) \times (3.64 - 2.73) + t_{1,2} \times 0.85 \sqrt{1 - 0.41^2}$
		Gongju	$q_{1,2} = 3.98 + (0.58 \times 0.75 / 0.45) \times (4.20 - 3.62) + t_{1,2} \times 0.75 \sqrt{1 - 0.58^2}$
		Gyuam	$q_{1,2} = 4.14 + (0.59 \times 0.75 / 0.45) \times (4.35 - 3.76) + t_{1,2} \times 0.75 \sqrt{1 - 0.59^2}$

Sim(LN) : Simulation equations derived by multi-season first-order Markov model with two parameter lognormal distribution.

$q_{i,j}$: $q_{i,j}$ should be transformed into $Q_{i,j}$ which is equalized to $\exp(q_{i,j})$

$t_{i,j}$: Standard normal random variate of month j for the i th year

Table-5. Simulation equations of February for the first year in the selected watersheds

Model	River	Water-sheds	Simulation equations
Sim(G)	Geum	Yongdam	$Q_{1,2} = 12.70 + (0.28 \times 9.87 / 4.33) \times (12.1 - 6.93) + t_{1,r,2} \times 9.87 \sqrt{1 - 0.28^2}$
		Geumsan	$Q_{1,2} = 19.17 + (0.29 \times 12.53 / 6.44) \times (19.6 - 10.41) + t_{1,r,2} \times 12.53 \sqrt{1 - 0.29^2}$
		Ogcheon	$Q_{1,2} = 32.33 + (0.18 \times 25.31 / 10.11) \times (38.1 - 17.61) + t_{1,r,2} \times 25.31 \sqrt{1 - 0.18^2}$
		Gongju	$Q_{1,2} = 68.39 + (0.38 \times 47.96 / 20.14) \times (67.0 - 41.01) + t_{1,r,2} \times 47.96 \sqrt{1 - 0.38^2}$
		Gyuam	$Q_{1,2} = 79.76 + (0.38 \times 55.37 / 23.38) \times (117.8 - 47.62) + t_{1,r,2} \times 55.37 \sqrt{1 - 0.38^2}$

Sim(G) : Simulation equations derived by multi-season first-order Markov model with Gamma distribution.

$t_{i,r,j}$: Random in Gamma distribution of month j for the i th year

나. 조화합성모형

대상유역별로 조화합성모형에 필요한 통계학적 매개변수인 평균치의 조화수 m_i^* , 표준편차의 조화수 S_i^* 를 구한 결과는 Table-6과 같고 각 유역별로 조화합성모형에 의해 모의발생 초년도 1월분 모의발생식만을 표본 예로 나타낸 결과는 Table-7과 같다.

다. 조화회귀모형

각 유역별로 조화회귀모형에 필요한 상수 a , b 및 γ_1 을 각각 실측월유출량으로 부터 구하고 이에 따른 각 유역별 모의발생 초년도 1월분 조화회귀모의발생식을 표본 예로 나타낸 결과는 Table-8과 같다.

4. 통계특성치의 비교

실측 월유출량 자료와 2변수 대수정규분포

Table-6. Estimated parameters of the harmonic synthetic model in the selected watersheds

River	Watershes	Param-eters	Month											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Geum	Yongdam	m_i^*	3.44	16.19	15.83	31.24	15.06	25.95	73.44	48.58	34.25	15.47	8.02	12.60
		S_i^*	3.13	11.07	12.76	19.14	11.47	26.95	44.50	29.61	24.69	9.26	4.82	5.35
	Geumsan	m_i^*	4.71	24.86	26.22	52.36	25.81	44.86	123.43	82.96	56.11	23.70	12.60	20.14
		S_i^*	4.22	14.74	21.29	32.29	19.37	45.44	73.96	50.27	38.47	13.38	7.33	8.53
	Ogcheon	m_i^*	5.81	44.12	36.49	82.54	36.23	71.04	212.48	140.85	111.46	45.17	15.33	34.07
		S_i^*	4.51	30.91	31.94	56.60	26.61	72.27	133.84	91.48	99.14	36.83	8.20	15.49
	Gongju	m_i^*	21.95	87.43	74.41	162.4	85.56	143.57	401.19	313.84	253.26	102.4	46.58	73.38
		S_i^*	10.32	57.76	49.48	108.7	67.19	142.88	223.91	184.36	207.33	53.17	19.62	30.94
	Gyiam	m_i^*	25.52	101.9	86.43	188.5	99.37	166.64	465.78	364.35	294.07	118.8	54.15	85.17
		S_i^*	11.96	66.78	57.43	126.3	77.99	165.92	259.82	214.08	240.71	61.75	22.82	35.94

Table-7. Simulation equations of January for the first year in the selected watersheds

Model	River	Watershed	Simulation equations
Sim(HS)	Geum	Yongdam	$q_1^* = 3.44 + 3.13 \cdot Z_1^*$
		Geumsan	$q_1^* = 4.71 + 4.22 \cdot Z_1^*$
		Ogcheon	$q_1^* = 5.81 + 4.51 \cdot Z_1^*$
		Gongju	$q_1^* = 21.95 + 10.32 \cdot Z_1^*$
		Gyuam	$q_1^* = 25.52 + 11.96 \cdot Z_1^*$

Sim(HS) : Simulation equations derived by harmonic synthetic model

Z_1^* : Standardized variate of January

형, Gamma 분포형, 조화합성모형 및 조화회귀모형에 의해 모의발생된 월유출량의 통계특성치 중 평균치, 표준편차 및 변동계수를 각 유역별로 분석 비교하였으며 그 표본 예로 용담 및 규암유역에 대한 결과는 Table-9 및 Table-10과 같다.

각 수계별 대상유역에 있어서 월관측치의 평균치와 각 모형에 의한 모의발생치의 월평균치를 비교해 보면 Gamma 분포형에 따른 다계절 1차 Markov 모형이 0.68~29.13%,

Table-8. Simulation equations of January for the first year in the selected watersheds

Model	River	Watershed	Simulation equations
Sim(HR)	Geum	Yongdam	$q_1 = 1.19 - 0.27 \times \cos\left(\frac{2\pi}{12}\right) - 0.14 \times \sin\left(\frac{2\pi}{12}\right) + 0.37t_1$
		Geumsan	$q_1 = 1.40 - 0.31 \times \cos\left(\frac{2\pi}{12}\right) - 0.14 \times \sin\left(\frac{2\pi}{12}\right) + 0.36t_1$
		Ogcheon	$q_1 = 1.60 - 0.29 \times \cos\left(\frac{2\pi}{12}\right) - 0.17 \times \sin\left(\frac{2\pi}{12}\right) + 0.38t_1$
		Gongju	$q_1 = 1.96 - 0.25 \times \cos\left(\frac{2\pi}{12}\right) - 0.20 \times \sin\left(\frac{2\pi}{12}\right) + 0.35t_1$
		Gyuam	$q_1 = 2.03 - 0.25 \times \cos\left(\frac{2\pi}{12}\right) - 0.20 \times \sin\left(\frac{2\pi}{12}\right) + 0.35t_1$

Sim(HR) : Simulation equations derived by harmonic regression model

t_1 : Standard normal random variate of January

q_1 : q_1 should be transformed into Q_1 which is equalized to 10^6

Table-9. Relative error for the basic statistics of observed and synthetic streamflows at Yongdam watershed in Geum river

M	Basic Statistics		\bar{Q}_j		S_j		C_v	
	Obs & Sim	CV	RE	CV	RE	CV	RE	
1	obs	6.93		4.33		0.63		
	sim(LN)	10.83	56.28	7.80	80.14	0.73	15.87	
	sim(G)	7.32	5.63	3.78	12.70	0.52	17.46	
	sim(HS)	3.55	48.77	2.7	37.64	0.76	20.63	
	sim(HR)	8.12	17.17	4.99	15.24	0.62	1.59	
	2	obs	12.70		9.87		0.78	
sim(LN)		12.24	3.62	9.24	6.38	0.76	2.56	
sim(G)		10.21	19.61	4.80	51.37	0.47	39.74	
sim(HS)		16.91	33.15	10.6	7.29	0.63	19.23	
sim(HR)		15.94	25.51	12.21	23.71	0.77	1.28	
3		obs	19.33		13.96		0.72	
	sim(LN)	23.05	19.24	18.31	31.16	0.79	9.72	
	sim(G)	24.21	25.25	14.31	2.51	0.59	18.06	
	sim(HS)	18.0	6.88	10.2	27.15	0.57	20.83	
	sim(HR)	12.22	36.78	7.58	45.70	0.62	13.89	
	4	obs	27.76		17.94		0.65	
sim(LN)		26.32	5.19	13.97	22.13	0.53	18.46	
sim(G)		23.24	16.28	11.79	33.28	0.51	21.54	
sim(HS)		32.22	16.07	12.8	28.71	0.4	38.46	
sim(HR)		21.63	22.08	21.36	19.06	0.99	52.31	
5		obs	18.55		12.67		0.68	
	sim(LN)	14.93	19.51	11.29	10.89	0.76	11.76	
	sim(G)	18.26	1.56	12.16	4.03	0.67	1.47	
	sim(HS)	16.42	11.48	7.7	39.38	0.47	30.88	
	sim(HR)	32.4	74.66	26.06	105.68	0.81	19.12	
	6	obs	22.46		25.76		1.15	
sim(LN)		18.77	16.43	23.66	8.15	1.26	9.57	
sim(G)		21.44	4.54	20.72	19.57	0.97	15.65	
sim(HS)		29.06	29.39	19.7	23.45	0.68	40.87	
sim(HR)		38.5	71.42	24.84	3.57	0.65	43.48	
7		obs	76.93		45.69		0.59	
	sim(LN)	84.59	9.96	55.48	21.43	0.66	11.86	
	sim(G)	85.03	11.26	42.44	7.11	0.50	15.25	
	sim(HS)	71.02	7.68	43.0	5.80	0.61	3.39	
	sim(HR)	28.07	63.51	17.62	61.44	0.63	6.78	
	8	obs	45.09		28.41		0.63	
sim(LN)		35.44	21.40	27.86	0.94	0.79	25.39	
sim(G)		34.07	23.62	17.58	38.12	0.52	17.46	
sim(HS)		43.17	4.26	27.5	3.10	0.64	1.59	
sim(HR)		32.17	28.43	30.26	6.51	0.94	49.21	

9	obs	37.74		25.89		0.69	
	sim(LN)	29.99	20.54	22.59	12.75	0.75	8.70
	sim(G)	34.67	8.13	19.74	23.75	0.57	17.39
	sim(HS)	31.85	15.60	24.9	3.82	0.78	13.04
	sim(HR)	28.19	25.30	23.25	10.20	0.83	20.29
10	obs	11.98		8.06		0.67	
	sim(LN)	11.62	3.01	8.68	7.69	0.75	11.94
	sim(G)	10.22	14.69	5.88	27.05	0.58	13.43
	sim(HS)	12.91	7.76	7.8	2.85	0.61	8.96
	sim(HR)	21.81	82.05	18.49	129.40	0.85	26.87
11	obs	11.52		6.02		0.52	
	sim(LN)	12.71	10.33	11.65	93.52	0.92	76.92
	sim(G)	12.44	7.99	6.27	4.15	0.5	3.45
	sim(HS)	7.53	34.64	4.6	23.26	0.61	17.31
	sim(HR)	11.49	0.26	9.39	55.98	0.82	57.69
12	obs	9.12		4.16		0.46	
	sim(LN)	10.88	19.3	13.58	226.44	1.25	171.74
	sim(G)	8.47	7.13	2.19	47.36	0.26	43.48
	sim(HS)	11.9	30.48	5.1	22.84	0.43	6.52
	sim(HR)	11.67	27.96	9.4	125.96	0.81	76.09

M : Month

Obs & Sim : Observed & simulated flows.

obs : Observed flows.

sim(LN) : Simulated by lognormal distribution.

sim(G) : Simulated by Gamma distribution.

sim(HS) : Simulated by Harmonic synthetic model.

sim(HR) : Simulated by Harmonic regression model.

CV : Calculated value

RE : Relative error

Table-10. Relative error for the basic statistics of observed and synthetic streamflows at Gyuam watershed in Geum river

M	Basic Statistics		\bar{Q}_j		S_j		C_v	
	Obs & Sim	CV	RE	CV	RE	CV	RE	
1	obs	47.62		23.38		0.49		
	sim(LN)	60.53	27.11	39.72	69.89	0.66	34.69	
	sim(G)	49.01	2.92	20.51	12.28	0.42	14.29	
	sim(HS)	24.51	48.53	10.8	53.89	0.44	10.2	
	sim(HR)	46.4	2.56	21.81	6.72	0.47	4.08	
2	obs	79.76		55.37		0.69		
	sim(LN)	60.38	24.3	22.09	60.1	0.37	46.38	
	sim(G)	58.59	26.54	22.54	59.29	0.39	43.48	
	sim(HS)	109.78	37.64	75.1	35.58	0.68	1.45	
	sim(HR)	86.84	8.88	66.51	20.12	0.77	11.59	

3	obs	108.5		68.84		0.63	
	sim(LN)	112.23	3.44	53.92	21.67	0.48	23.81
	sim(G)	132.06	21.71	70.76	2.79	0.54	14.29
	sim(HS)	96.48	11.08	56.3	18.16	0.58	7.94
	sim(HR)	72.3	33.36	53.43	22.39	0.74	17.46
4	obs	166.4		114.9		0.69	
	sim(LN)	138.9	16.53	84.96	26.06	0.61	11.59
	sim(G)	145.0	12.86	87.23	24.08	0.6	13.04
	sim(HS)	197.01	18.4	97.6	15.03	0.5	27.54
	sim(HR)	131.4	21.03	123.14	7.17	0.94	36.23
5	obs	121.47		89.4		0.74	
	sim(LN)	94.52	22.19	74.76	16.38	0.79	6.76
	sim(G)	118.83	2.17	63.34	29.15	0.53	28.38
	sim(HS)	116.9	3.76	59.0	33.96	0.51	31.08
	sim(HR)	188.06	54.82	150.27	68.09	0.8	8.11
6	obs	144.56		154.52		1.07	
	sim(LN)	147.63	2.12	184.74	19.56	1.25	16.82
	sim(G)	136.12	5.84	137.19	11.22	1.01	5.61
	sim(HS)	192.79	33.86	137.4	11.09	0.71	33.64
	sim(HR)	290.59	101.02	186.32	20.58	0.64	40.19
7	obs	487.56		271.29		0.56	
	sim(LN)	538.2	100.39	335.0	23.48	0.62	10.71
	sim(G)	518.85	6.34	282.8	4.24	0.55	1.79
	sim(HS)	486.5	0.29	274.1	1.05	0.56	0.0
	sim(HR)	212.32	56.49	136.31	49.75	0.64	14.29
8	obs	342.26		202.68		0.59	
	sim(LN)	225.12	34.23	85.72	57.71	0.38	35.59
	sim(G)	269.69	21.2	131.95	34.9	0.49	16.95
	sim(HS)	333.62	2.52	228.2	12.61	0.68	15.25
	sim(HR)	235.16	31.3	216.42	6.78	0.92	55.93
9	obs	316.17		252.12		0.8	
	sim(LN)	231.81	26.68	175.96	30.21	0.76	5.0
	sim(G)	284.96	9.87	252.72	0.24	0.89	11.25
	sim(HS)	287.34	9.11	256.6	1.8	0.89	11.25
	sim(HR)	195.88	38.05	177.01	29.79	0.9	12.5
10	obs	96.76		50.35		0.52	
	sim(LN)	77.4	20.01	38.3	23.33	0.5	3.85
	sim(G)	98.59	1.89	38.02	24.49	0.39	25.0
	sim(HS)	108.73	12.37	62.8	24.83	0.58	11.54
	sim(HR)	195.6	102.15	168.95	235.55	0.86	65.38
11	obs	76.25		34.24		0.45	
	sim(LN)	79.67	3.93	45.55	33.03	0.57	26.67
	sim(G)	74.97	1.68	34.7	1.34	0.46	2.22
	sim(HS)	52.6	31.02	26.7	21.81	0.51	13.33
	sim(HR)	91.02	20.42	70.75	106.63	0.78	73.33

obs	63.08		24.54		0.39	
sim(LN)	64.52	2.28	37.29	51.96	0.58	40.27
sim(G)	57.43	8.96	16.62	32.27	0.29	25.64
sim(HS)	82.39	30.61	38.3	55.9	0.47	20.51
sim(HR)	81.25	28.8	78.35	221.31	0.97	48.72

M : Month

Obs & Sim : Observed & simulated flows.

obs : Observed flows.

sim(LN) : Simulated by lognormal distribution.

sim(G) : Simulated by Gamma distribution.

sim(HS) : Simulated by Harmonic synthetic model.

sim(HR) : Simulated by Harmonic regression model.

CV : Calculated value

RE : Relative error

2변수 대수정규분포형에 의한 다계절 1차 Markov 모형이 0.11~129.64%, 조화합성모형이 0.29~73.09% 및 조화회귀모형에서 0.26~150.22% 범위의 상대오차를 나타낸점으로 보아 이중 Gamma 분포에 따른 다계절 1차 Markov 모형이 가장 좋은 결과를 나타내었다. 그리고 이들 4개 모형에 의해 모의발생된 각 월의 평균치를 대상유역별로 월 관측치와 함께 도시한 결과는 Fig. 1~Fig. 5와 같다. 여기에서 특히 장마기인 6, 7월의 각 모형에 의해 모의발생된 평균 월유출량을 월관측치의 평균치와 비교한 결과 Gamma 분포에 의한 다계절 1차 Markov 모형이 3.19~15.23%, 2변수 대수정규분포에 의한 다계절 1차 Markov 모형이 2.12~18.76%, 조화합성모형 및 조화회귀모형이 각각 0.29~61.74% 및 56.49~110.42% 범위의 상대오차를 나타내었다.

이상의 Fig. 1~Fig. 5에서 볼수 있는 바와 같이 Gamma분포에 의해 모의발생된 월유출량의 평균치가 타 모형들에 의한 모의발생 월평균치에 비해 월유출량의 평균치가 타 모형들에 의한 모의발생 월평균치에 비해 월평균 관측치에 보다 접근하고 있음을 보여주고 있다. 2변수 대수정규분포에 의한 다계절 1차

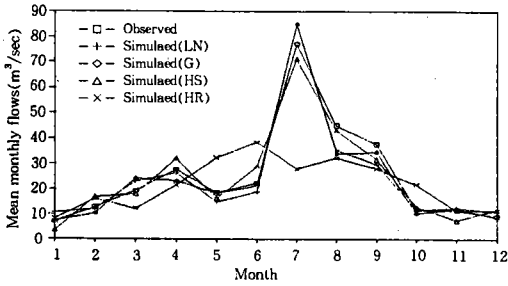


Fig. 1. Comparison between the mean of observed and synthetic streamflows at Yongdam watershed in Geum river

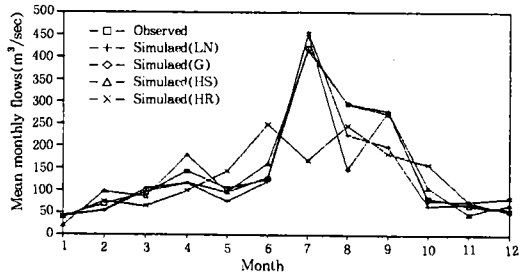


Fig. 4. Comparison between the mean of observed and synthetic streamflows at Gongju watershed in Geum river

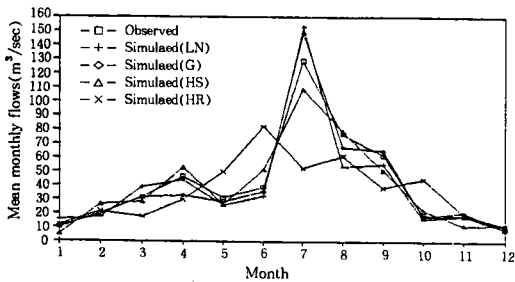


Fig. 2. Comparison between the mean of observed and synthetic streamflows at Geumsan watershed in Geum river

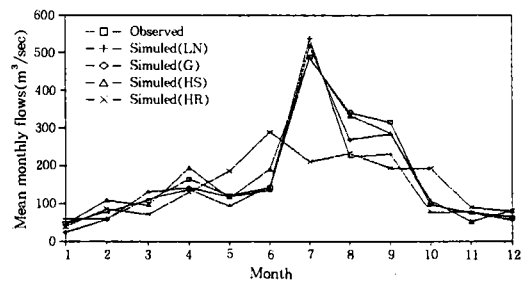


Fig. 5. Comparison between the mean of observed and synthetic streamflows at Gyuam watershed in Geum river

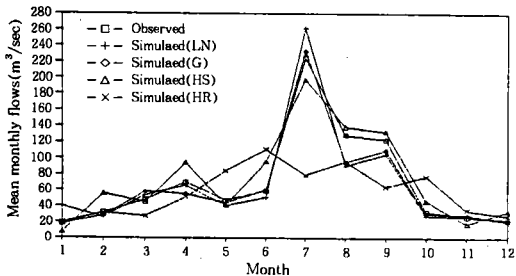


Fig. 3. Comparison between the mean of observed and synthetic streamflows at Ogchon watershed in Geum river

Markov 모형, Gamma분포에 의한 다계절 1차 Markov 모형, 조화합성모형 및 조화회귀 모형의 변동계수를 실측치의 것과 유역별로 비교한 결과 용담유역은 1.28~171.74%, 금산유역은 1.69~125.0%, 옥천유역은 0~129.55%, 공주유역은 0.93~123.0%로 그리고,

규암유역은 0~73.33% 범위의 상대오차를 나타내었다.

특히, 장마기인 6, 7월의 2변수 대수정규분포에 의한 다계절 1차 Markov 모형, Gamma분포에 의한 다계절 1차 Markov 모형, 조화합성모형 및 조화회귀모형의 모의발생치에 대한 변동계수를 실측치의 것과 비교하면 2변수 대수정규분포에 의한 다계절 1차 Markov 모형은 1.77~38.71%, Gamma분포에 의한 다계절 1차 Markov 모형은 0.93~21.24%, 조화합성모형은 0~40.87%, 조화회귀모형은 6.78~43.48% 범위의 상대오차를 나타내었다. 각 모형에 의해 모의발생된 월유출량과 관측된 월유출량의 변동계수 변화를 대상유역별로 도시한 결과는 Fig. 6~Fig. 10과 같다.

이상의 결과를 종합해 보건데 Gamma분포

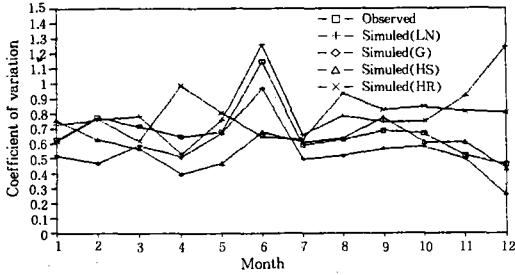


Fig. 6. Comparison between variation of observed and synthetic streamflows at Yongdam watershed in Geum river

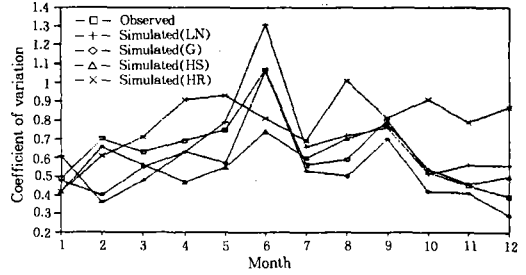


Fig. 9. Comparison between variation of observed and synthetic streamflows at Gongju watershed in Geum river

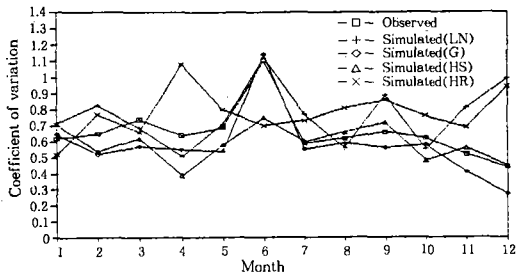


Fig. 7. Comparison between variation of observed and synthetic streamflows at Geumsan watershed in Geum river

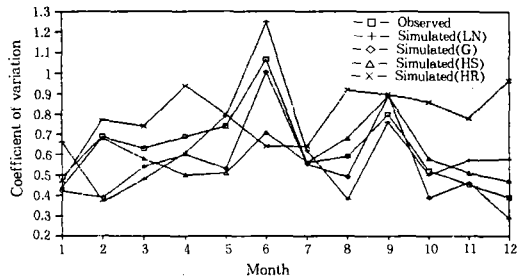


Fig. 10. Comparison between variation of observed and synthetic streamflows at Gyum watershed in Geum river

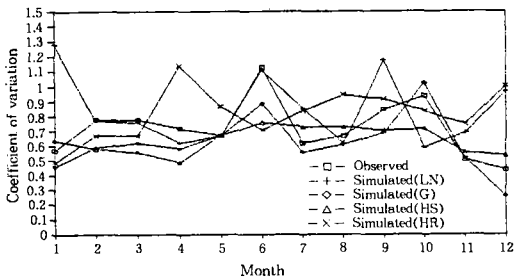


Fig. 8. Comparison between variation of observed and synthetic streamflows at Ogchon watershed in Geum river

V. 결 론

본 연구에서는 금강 수계의 5개 유역을 대상으로 월유출량에 관한 적정분포형을 찾아내고 적정분포형에 따른 통계특성치간의 비교 분석과 함께 각 분포형에 대한 다계절 1차 Markov모형, 조화합성모형 및 조화회귀모형의 적용으로 모의발생시킨 합성월유출량을 실측치와 비교 검토하였으며 이에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 월유출량 자료의 적정확률분포형 설정을 위해 K-S검정 결과 전 유역에 걸쳐 Gamma 분포 및 2변수 대수정규분포의 적합도가 인정되었다.

2. 모의발생된 월유출량과 실측치간의 평균치를 비교 분석한 결과 금강 수계는 Gamma

에 의한 다계절 1차 Markov 모형의 월평균치와 하천유량의 변화양상의 지표가 되는 변동계수가 공히 타 모형에 의한 것 보다 관측치에 보다 접근되는 좋은 결과를 보여 주고 있다.

분포에 의한 다계절 1차 Markov 모형에 의해 모의발생된 월유출량의 평균치가 2변수 대수 정규분포에 의한 다계절 1차 Markov 모형, 조화합성모형 및 조화회귀모형의 결과에 비해 일반적으로 실측치에 보다 더 접근됨을 보여 주고 있다.

3. 모형별로 모의발생된 월유출량의 유량변화 지표인 변동계수의 변화를 실측치에 대해 비교한 결과 Gamma분포의 다계절 1차 Markov 모형에 의한 변동계수가 2변수 대수 정규분포에 의한 다계절 1차 Markov 모형과 조화합성모형 및 조화회귀모형에 비해 실측치의 값에 보다 더 근접되는 양상을 보여 주고 있다.

4. 적정모의발생모형으로 판정된 Gamma분포에 따른 다계절 1차 Markov 모형에 의해 100년 이상의 월유출량을 모의발생 시켰다.

본 논문은 1995년 후반기 한국과학재단 국내 Post-Doc 연수지원으로 수행된 것임

참 고 문 헌

1. Barns, F. B., Storage Required for a City Water Supply, J. I. E. Aust., Vol. 26, pp. 198, 1954.
2. Beard, L. R., Use of Interrelated Records to Simulate Streamflow, J. Hy. Div. ASCE, Vol. 91, HY5, pp. 13~22, 1965.
3. _____, Streamflow Synthetic for Ungaged Rivers, Proc. IASH, 1967.
4. 천덕진, 최영박, 수문학적 모의기법에 대한 연구, 한국수문학회지, Vol. 13, No. 1, pp. 49~56, 1980.
5. 최한규, 최영박, 김치홍, 하천유량의 수문학적 모의기법에 관한 연구(I), 한국수문학회지, Vol. 15, No. 2, pp. 33~39, 1982.
6. _____, 추계학적 저수용량 결정에 관한 연구, 한국수문학회지, Vol. 19, No. 2, pp. 149~155, 1986.
7. Chow, V. T., (ed.), Sequential Generation of Hydrologic Information, Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill, N. Y., Chap. 8-IV, pp. 8-91~8-96, 1964.
8. Fiering, M. B., Multivariate Technique for Synthetic Hydrology, J. Hy. Div. ASCE, Vol. 90, HY5, pp. 43~60, 1964.
9. _____, Streamflow Synthetic, Harvard University Press, Cambridge, Mass, 1967.
10. _____ and B. B. Jackson, Synthetic Streamflow, American Geophysical Union, Water Resources Monograph, 1, 1971.
11. Harms, A. A. and T. H. Campbell, An Extension to the Thomas-Fiering Model for the Sequential Generation on Streamflow, Water Resources Research, Vol. 3, No. 3, 1967.
12. Haan, C. T., Statistical Method in Hydrology, Iowa State University Press, Ames, pp. 97~158, 1977.
13. Klemes, V. and L. Boruvka, Simulation of Gamma-Distribution First-Order Markov Chain, Water Resources Research, Vol. 10, No. 1, pp. 87~91, 1974.
14. Kottegoda, N. T., Stochastic Five Daily Stream Flow Model, J. Hyd. Div., ASEC, Vol. 98, HY9, 1972.
15. 이종남, 남한강수계의 월강우량과 월유출량의 시계열 산술모형, 한국수문학회지, Vol. 14, No. 2, pp. 71~79, 1981.
16. 이순탁, 하천유량의 모의발생에 관한 추계학적 연구, 박사학위논문, 고려대학교, 대

- 학원, 토목공학과, 1974.
17. _____, 안경수, 이의락, Simulation Technique에 의한 수자원의 변동양상 및 그 모의발생모델에 관한 연구, 한국수문학회지, Vol. 9, No. 2, pp. 87~100, 1976.
 18. 이순혁 외, 응용수문학, 향문사, pp. 302~324, 1984.
 19. _____, 홍성표, Markov모형에 의한 월유출량의 모의발생에 관한 연구, 한국농공학회지, Vol. 32, No. 4, pp. 31~49, 1989.
 20. _____, 맹승진, 박종국, 장기유출량의 추계학적 모의발생에 관한 연구(I)(II), 한국농공학회지, Vol. 35, No. 3, pp. 100~129, 1993.
 21. Maass, A., et al, Design of Water Resources Systems, Harvard University Press, 1962.
 22. Matalas, N. C., Statistics of a Runoff-Precipitation Relation, U. S. Geological Survey, Professional Paper 434-D, 1963.
 23. _____, Mathematical Assessment of Synthetic Hydrology, Water Resources Research, Vol. 3, No. 4, 1967.
 24. Mckerchar, A. I. and J. W. Delleur, Application of Seasonal Parametric Linear Stochastic Models to Monthly Flow Data, Water Resources Research, Vol. 10, No. 2, 1974.
 25. McMahon, T. A. and A. J. Miller, Application of Thomas-Fiering Model to Skewed Hydrologic Data, Water Resources Research, Vol. 7, No. 5, 1971.
 26. _____, et al, Stochastic Generation of Streamflow Data, Civil Engineering Research Reports, No. 2, Monash University, 1972.
 27. Meyer, H. A., (ed.), Symposium on Monte Carlo Methods, John Wiley & Sons Inc., N. Y., 1956.
 28. Murota, A and T. Kanda, A Stochastic Model to Simulate Monthly River Flow Sequences, Proc. 13th Cong. IAHR, Vol. 1, pp. 163~170, 1969.
 29. 박찬령, 서병하, Dissagregation모형에 의한 월유량의 추계학적 모의발생, 한국수문학회지, Vol. 19, No. 2. pp. 167~179, 1986.
 30. Quimpo, R. G, Stochastic Analysis of Daily River Flows, J. Hy. Div., ASCE, Vol. 94, HY1, pp. 43~57, 1968.
 31. _____ and V. Yevjevich, Stochastic Description of Daily River Flows, Proc. Intern. Hydrol. Symposium, Vol. 1, pp. 290~297, Fort. Collins, Colorado, 1967.
 32. 산업기지개발공사, 금강유역조사보고서, 1986.
 33. 서병하, 윤용남, 강관원, BIVARIATE ANALYSIS에 의한 월유량의 모의발생에 관한 연구, 한국수문학회지, Vol. 12, No. 2, pp. 63~69, 1979.
 34. Sudler, C. E., Storage Required for Regulation of Streamflow, Trans. ASCE, Vol. 91, p. 622, 1927.
 35. Wang, Ru Yih, A Study on the Simulation of Monthly Streamflows of Watersheds in Taiwan, Journal of Chinese Agricultural Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 1~17, 1974.
 36. Yevjevich, V., Stochastic Processes in Hydrology, Water Resources Publication, Fort Collins, Colorado, pp. 249~259, 1972.
 37. 윤용남, 공업수문학, 청문각, pp. 495~530, 1988.

(접수일자 : 1996년 4월 20일)