

## 間歇 水文過程의 模擬發生 模型(I)

- 交代再生過程(ARP)과 連續確率分布 -

## A Simulation Model for the Intermittent Hydrologic Process(I)

- Alternate Renewal Process (ARP) and Continuous Probability Distribution -

李在浚\* · 李正植\*\*

Lee, Jae Joon · Lee, Jung Sik

## Abstract

This study is an effort to develop computer simulation model that produce precipitation patterns from stochastic model. A stochastic model is formulated for the process of daily precipitation with considering the sequences of wet and dry days and the precipitation amounts on wet days. This study consists of 2 papers and the process of precipitation occurrence is modelled by an alternate renewal process (ARP) in paper (I). In the ARP model for the precipitation occurrence, four discrete distributions, used to fit the wet and dry spells, were as follows; truncated binomial distribution (TBD), truncated Poisson distribution (TPD), truncated negative binomial distribution (TNBD), logarithmic series distribution (LSD). In companion paper (II) the process of occurrence is developed by Markov chain. The amounts of precipitation, given that precipitation has occurred, are described by a Gamma, Pearson Type-III, Extremal Type-III, and 3 parameter Weibull distribution. Daily precipitation series model consists of two models, A-W and A-G model, by combining the process of precipitation occurrence and a continuous probability distribution on the precipitation of wet days. To evaluate the performance of the simulation model, output from the model was compared with historical data of 7 stations in the Nakdong and Seomjin river basin. The results of paper (I) show that it is possible to design a model for the synthetic generation of point precipitation patterns.

## 要 旨

본 연구는 간헐 수문과정인 일 강수계열의 모의발생 모델을 개발한 것으로서, 일 강수계열의 구조적 특성인 강수발생과정과 습윤일의 강수량과정을 고려하였다. 본 연구는 두편의 논문으로 구성되어 있으며, 연구(I)에서는 강수발생과정을 위하여 교대재생과정(ARP)을 이용하였으며, 건조·습윤계속기간 분포에 대해서는 TBD, TPD, TNBD, LSD의 4가지 이산형 확률분포를 적용하였다. 후속논문인 연구(II)에서는 강수발생과정으로 Markov 연쇄모델을 이용한다. 그리고 습윤일의 강수량 분포에 대해서는 Gamma 분포, Pearson Type-III 분포, Type-III 극치분포, 3모수 Weibull 분포의 4가지 연속형 확률분포를 적

\* 정회원 · 금오공과대학교 토목공학과 조교수, 공학박사

\*\* 정회원 · 금오공과대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

용하였다. 연구(I)에서는 낙동강 유역의 대구, 고령, 밀양, 영주 관측소 및 섬진강 유역의 하동, 순창, 구례 관측소의 일 강수계열 자료를 사용하였으며, 강수발생과정과 습윤일의 강수량과정을 조합하여 구성한 두가지의 일 강수계열 모의발생 모델 A-W, A-G 모델의 적용성을 확인하였다.

## 1. 서 론

장기간의 수자원 계획을 위한 유황예측은 우선 유량의 공급원이 되는 강수를 모의발생하고, 모의발생된 강수를 유출기구를 고려한 유출해석법을 통해 유량으로 변환시키므로써 가능하게 된다. 이러한 관점에서 볼 때, 우선 장기간에 걸친 강수현상의 분명한 파악과 그 모의발생 모델의 확립은 불가피하다고 생각된다.

일강수량, 증발량, 간헐천의 유량, 유사량과 같은 수문사상은 아주 빈번하게 장기간 발생되지 않는 경우가 있으며, 이러한 경우에는 이들을 간헐 수문과정으로서 취급하는 시도가 이루어져야 한다. 특히 강수계열은 습윤계속기간(Wet Spells)과 건조계속기간(Dry Spells)으로 구성되어 있어 간헐 수문과정의 대표적인 경우가 되는 것이다. 그러나 강수사상에 관한 종래의 연구는 강수량 또는 건습일 계열만을 대상으로 한 단일모델이 대부분을 이루고 있으며, 강수발생 과정과 강수량을 고려한 강수계열의 모델은 미미한 편이다.

강수현상에 관한 종래의 연구는 크게 Markov Chain(연쇄) 모델과 교대재생과정(Alternate Renewal Process : ARP) 모델 그리고 Point 과정 모델로 나눌 수가 있으며, 초기에는 건습일의 지속성 등에 주안점을 두고 이루어졌다. 강수현상은 지속기간에 따라 불규칙한 특성을 보이고 있으므로 일 단위의 강수계열과 그 이하의 짧은 시간단위에 대한 강수계열의 해석에는 커다란 차이가 있게 되며, Markov 연쇄 모델과 교대재생과정 모델은 일단위의 강수계열의 해석에 주로 이용되어 왔다.

그러나 강수사상은 지역적 특수성이 매우 강하므로 우리나라의 강수사상을 대표할 수 있는 일반화된 일 강수계열 모의발생 모델의 개발이 절실히 요구되는 바이므로 보다 다각적인 방법의 모색과 통계적 모수의 합리적인 추정을 통한 모델의 개선이 요망된다. 그러므로 우리나라의 강수특성에 적합한 강

수량의 빈도분포와 모수 및 천이확률에 바탕을 두고 임의 기간동안의 일강수 기록을 모의발생시킬 수 있고, 홍수기간 및 한발기간의 수자원 시스템의 운영, 농업계획, 건설공정의 작성 등 광범위한 적용을 위하여 최대 습윤계속기간과 최대 건조계속기간을 예측할 수 있는 모델의 개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 간헐 강수과정의 추계학적 해석을 통하여 일 강수사상에 관한 모의발생 모델을 확립하는데 목적을 두고 있으며, 이를 위해 간헐 수문사상의 대상으로 일강수 사상을 택하고 건습일에 관한 강수발생 과정과 습윤일의 강수량 분포를 고려하여 장기간에 걸친 일강수 사상의 추계학적 모의발생 모델을 개발하고자 한다.

### 1.1 연구범위 및 기본가정

일 강수계열은 습윤계속기간과 건조계속기간이 교대로 계속되면서 구성되어 있는 간헐 수문과정이다. 본 연구에서는 이러한 일 강수계열의 구조적 특성을 고려하여 건조·습윤계속기간 계열을 나타내기 위한 이산형 강수발생과정(또는 건습과정)과 강수가 발생한 날(wet day; 습윤일)의 강수량에 대한 과정으로 나누어 해석하기로 하며, 두가지의 경우를 결합하여 간헐 수문과정인 일 강수계열의 추계학적 모의발생 모델을 개발하기로 한다.

이러한 방법을 사용하기 위해서는 습윤일에 대한 적절한 정의가 필요하며, 어떤 threshold(또는 trace; 흔적량)보다 작은 강수량을 기록한 날은 건조일로 고려한다. 또한 습윤계속기간은 양쪽이 건조일로 제한되는 습윤일 계열로서 정의하며, 이와 비슷하게 건조계속기간도 정의하기로 한다. 본 연구에서는 threshold를 수문학적 강수의 기준치인 0.1 mm로 택하며, 건습과정(wet-dry process)은 계절적인 변동을 보이고 있으므로 매 월별로 분리하여 해석하기로 한다. 또한 연구의 진행과정에서 일 단위의 강수계열은 지속기간 24시간의 강수사상이 아닌 calendar day하의 강수사상을 사용하였으며, 윤

년의 윤일(2월 29일)은 무시하였다.

## 2. 교대재생과정(Alternate Renewal Process)에 의한 강수발생과정

일 강수계열은 식 (1)과 같은 확률과정(stochastic process)에 의하여 기술할 수 있다.

$$Z_t = X_t Y_t, \quad t=1, 2, \dots \quad (1)$$

여기서, 습윤일이면,  $X_t=1$ 이고 건조일이면  $X_t=0$ 이며,  $Y_t$ 는 강수량을 나타내는 분포함수에 의해 기술된다. 그러므로 강수발생과정  $X_t$ 의 표본은 0과 1의 계열로 이루어진다.

길이가  $k$ 인 건조계속기간은  $k$ 일간 건조일이 계속되고 양쪽이 습윤일로 제한되는 계열로서 정의하며 이와 비슷하게 습윤계속기간도 정의할 수 있다. 따라서 강수의 발생과정은 교대하는 건습계속기간의 계열로서 고려할 수 있다.

### 2.1 기본가정

ARP 모델에서 습윤계속기간과 건조계속기간은 다음과 같이 거동하는 것으로 가정한다.

- ① 모든 습윤계속기간내의 각개 변량들은 동일한 확률분포  $\{F^{(W)}\}$ 를 갖는다.
- ② 모든 건조계속기간내의 각개 변량들은 동일한 확률분포  $\{F^{(D)}\}$ 를 갖는다.
- ③ 연속하는 습윤계속기간과 건조계속기간의 길이는 서로 독립이다.

이들 가정을 바탕으로 ARP 모델에 의한 강수발생과정은 건습계속기간에 관한 두개의 분포  $\{F^{(W)}\}$ 와  $\{F^{(D)}\}$ 를 택함으로써 규정된다.

### 2.2 건습계속기간에 대한 적합분포형

$i$ 번째 일에 시작하여  $k$ 일 계속되는 길이가  $k$ 인 건조계속기간은 식 (2)와 같이 정의되는 사상이다.

$$\{X_{i-1}=1, X_i=0, X_{i+1}=0, \dots, X_{i+k-1}=0, X_{i+k}=1\} \quad (2)$$

건조계속기간 및 습윤계속기간이  $i$ 번째 일에 시작되어 길이가  $L_0$  및  $L_1$ 이  $k$ 일 확률은 다음과 같다.

$$\Pr\{L_0=k\} = \Pr\{X_{i-1}=1, X_i=0, X_{i+1}=0, \dots, X_{i+k-1}=0, X_{i+k}=1 | X_{i-1}=1, X_i=0\} \quad (3)$$

$$\Pr\{L_1=k\} = \Pr\{X_{i-1}=0, X_i=1, X_{i+1}=1, \dots, X_{i+k-1}=1, X_{i+k}=0 | X_{i-1}=0, X_i=1\} \quad (4)$$

여기서,  $L_0, L_1$ : 건조계속기간과 습윤계속기간의 길이

습윤계속기간과 건조계속기간 분포의 변량은 0을 포함하고 있지 않고 자연수만으로 구성되기 때문에, 습윤계속기간과 건조계속기간의 길이에 적합시킨 분포형으로는 다음과 같은 절단이항분포(truncated binomial distribution: TBD), 절단포아슨분포(truncated Poisson distribution: TPD), 절단음이항분포(truncated negative binomial distribution: TNBD), 대수급수분포(logarithmic series distribution: LSD)의 4가지 이산형 분포형을 사용하기로 하며, 각 분포형의 모수(parameter)는 최우추정법에 의해 추정한다. 또한 자료에 대해 최량적합(best fit)을 주는 분포형을 결정하기 위해 대수우도(log likelihood)와  $\chi^2$  적합도 검정을 사용하기로 한다.

#### 2.2.1 절단이항분포(TBD)

이 분포형은 1949년, Finney<sup>(1)</sup>에 의해서 식 (5)의 형태로 표현되었으며, 0이 절단된 이 분포형은 절단(truncation)이 0보다 큰 값을 포함하거나 또는 오른쪽에서 발생하므로 양(+의) 이항분포라고도 부른다.

TBD의 확률질량함수는 식 (5)와 같고, 모수는 최우추정법을 이용하여 추정한다.

$$\Pr(L_0 \text{ 및 } L_1=k) = \frac{\binom{N_b}{k} p^k q^{N_b-k}}{1-q} \quad (5)$$

여기서,  $q=1-p, 0 < p < 1, k > 0$

$p$ : 습윤 또는 건조일일 확률

$N_b$ : 변량의 최대값

#### 2.2.2 절단포아슨분포(TPD)

이 분포형은 1926년, McKendrick<sup>(2)</sup>에 의해서 기술되었으며 양의 포아슨분포라고도 한다.

TPD의 확률질량함수는 식 (6)과 같고, 모수는 최우추정법을 이용하여 추정한다.

$$\Pr(L_0 \text{ 및 } L_1=k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!(1-e^{-\lambda})} \quad (6)$$

여기서,  $k=1, 2, 3, \dots$

### 2.2.3 절단음이항분포(TNBD)

이 분포형은 1955년, Sampford<sup>(3)</sup>에 의해 기술되었으며 식 (7)과 같은 확률질량함수를 갖고, 모수는 최우추정법을 이용하여 추정한다.

$$P(L_0 \text{ 및 } L_1=k) = \frac{\binom{N+k-1}{N-1} p^k (1+p)^{-(N+k)}}{1 - (1+p)^{-N}}$$

여기서,  $k=1, 2, 3, \dots$   
 $p>0, N>0$

이 분포형은  $N=1$ 일 때 기하분포가 되고  $N \rightarrow 0$ 이 되면서는 대수급수분포가 된다.

### 2.2.4 대수급수분포(LSD)

이 분포는 1943년, Fisher 등<sup>(4)</sup>에 의해 최초로 기술되었으며 대수분포라고도 한다.

이 분포형의 이름은  $\ln(1-\theta)$ 의 급수확장에서 유래되었으며, TNBD에서 모수  $N$ 이 0에 접근하는 특수한 형태로서 식 (8)과 같은 확률질량함수를 갖고, 모수는 최우추정법을 이용하여 추정한다.

$$P(L_0 \text{ 및 } L_1=k) = \frac{-\theta^k}{k \ln(1-\theta)} \quad (8)$$

여기서,  $0<\theta<1$

### 2.3 이산형 확률분포로부터의 확률변수의 모의 발생

습윤계속기간과 건조계속기간이 서로 독립임이 확인되면 추정된 적합 이산형 확률분포로부터 direct inverse-transform method(Law and Kelton<sup>(5)</sup>)에 의해 습윤계속기간과 건조계속기간을 서로 독립적으로 결정한다.

Direct inverse-transform method는 변량의 가능 범위가 유한하든지 혹은 무한하든지 간에 임의의 이산형 분포의 변량을 모의발생하는데 사용될 수 있으며, 그 절차는 다음과 같다.

먼저, (0, 1)에서 균등분포(uniform distribution)를 갖는 난수를 발생시킨다.

두번째, 식 (9)를 만족하는 음이 아닌 정수  $m$ 을 구하고 식 (9)가 만족되면  $m$ 을 변량으로 주고, 다음 변량을 모의발생하기 위해 첫째 단계로 진행한다.

식 (9)는 확률질량함수의 누적확률형태이며 이 식은 변량  $m$ 의 비초과확률(or 초과확률 = 1 - 비초과확률)을 규정하고 있다.

$$\sum_{k=1}^{m-1} P_k \leq R_u < \sum_{k=1}^m P_k \quad (9)$$

여기서,  $P_k = \Pr(L_0 \text{ 및 } L_1=k)$ 이고  $m=1$ 일 때의 좌변은 0으로 한다.

본 연구에서 이산형 분포를 적용한 건조 및 습윤계속기간은 변량의 범위가  $X>0$ 이므로 식 (9)에서  $k=0$ 을  $k=1$ 로 대치한 식 (9)를 사용하였으며, 자세한 사항은 참고문헌 (5)를 참조하기 바란다.

$$\sum_{k=0}^{m-1} P_k \leq R_u < \sum_{k=0}^m P_k \quad (9')$$

이와 같이 습윤계속기간과 건조계속기간을 결정하여 가면서 임의의 연수 동안의 강수를 모의발생하고 이후 다른 기간에도 계속하여 그 기간의 강수자료 집단의 특성치에 대응한 같은 형태의 난수를 발생하여 적용한다.

### 3. 습윤일의 강수량 분포

습윤계속기간내의 강수량간에는 종종 작은 값의 계열상관이 존재하고 있으나 종속성이 있다고 보기에는 무리가 많다. 따라서 습윤일의 강수량 거동을 모델화하기 위하여 연속하는 사상(events)간의 독립성을 가정하여 이론적인 분포를 적용시키고자 한다.

일 강수량의 빈도분포는 보통 역 J자형을 이루고 있으므로 적합에 사용한 확률분포형은 형상모수(shape parameter)의 변화에 따라 다양한 분포형을 보이며 강수량분포 해석에 잘 맞다고 알려진 Gamma 분포, Pearson Type-III 분포(PT3), Type-III 극치분포(T3E), 3모수 Weibull 분포로서, 이들 분포형에 대한 모수는 모멘트법과 최우추정법을 이용하여 추정하기로 한다.

#### 3.1 Gamma 분포

각각 모수가  $\alpha$ 인 지수분포를 이루는 확률변량  $\beta$ 개의 합의 분포는 모수  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 가진 Gamma 분포가 된다. 일반적으로  $\beta$ 는 정수로 주어지지 않으며  $\beta=1$ 인 특수한 경우가 바로 지수분포가 된다.

Gamma 분포의 확률밀도함수는 식 (10)과 같다.

$$P(x) = \frac{\alpha^\beta x^{\beta-1} e^{-\alpha x}}{\Gamma(\beta)} \quad (10)$$

여기서,  $x, \alpha, \beta > 0$

$\alpha$  : 축척모수(scale parameter)

$\beta$  : 형상모수(shape parameter)

본 연구에서는 모멘트법과 최우추정법인 Thom의 방법<sup>(6)</sup>과 Greenwood와 Durand의 방법<sup>(7)</sup>을 이용하기로 하며,  $\chi^2$  적합도가 더 양호한 결과를 채택하여 Gamma 분포 모수의 최우추정치로 사용된다.

### 3.2 Pearson Type-III 분포

Pearson Type-III 분포는 수문해석에서 널리 사용되는 분포중의 하나로 3모수 Gamma 분포로 알려져 있으며, 확률밀도함수는 식 (11)과 같다.

$$P(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left( \frac{x-x_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} \text{EXP} \left( - \frac{x-x_0}{\alpha} \right) \quad (11)$$

$\alpha > 0 ; x_0 \leq x < \infty$

$\alpha < 0 ; -\infty < x \leq x_0$

여기서,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 분포형의 축척 및 모양을 결정하는 모수이며,  $x_0$ 는 0이 아닌 값을 갖는 위치 모수이다.

### 3.3 Type-III 극치분포

Type-III 극치분포는 2모수 Weibull 분포로 알려져 있으며, 변량  $x$ 에 대한 하한(low limit)이 0인 특수한 형태로서 식 (12)와 같은 확률밀도함수를 갖는다.

$$P(x) = \beta x^{\beta-1} \alpha^{-\beta} \exp\{- (x/\alpha)^\beta\} \quad (12)$$

여기서,  $x \geq 0$  : 형상모수  $\beta$ , 축척모수  $\alpha > 0$

Type-III 극치분포의 확률밀도함수 형태는  $\beta < 1$ 일 때의 역J자형으로부터  $\beta = 1$ 일 때는 지수분포가 되고  $\beta$ 가 증가함에 따라 거의 대칭분포를 이루게 된다.

### 3.4 Weibull 분포(3모수)

Type-III 극치분포에서 만약 최소치의 하한치가 0이 아니면 하한치의 위치를 표시하는 변위모수(displacement parameter)  $\epsilon$ 이 도입되며, 이러한 3모수

Weibull 분포의 확률밀도함수는 식 (13)과 같다.

$$P(x) = \beta(x-\epsilon)^{\beta-1}(\alpha-\epsilon)^{-\beta} \exp[-\{(x-\epsilon)/(\alpha-\epsilon)\}^\beta] \quad (13)$$

여기서,  $x \geq 0 ; \alpha, \beta > 0$

여기서,  $\alpha$ 는 축척모수,  $\beta$ 는 형상모수,  $\epsilon$ 은 위치모수이다.

## 4. 모델의 적용 및 고찰

본 장에서는 앞에 설명한 이론적 접근방법을 대상지점에 적용하여 그 결과를 고찰하기로 한다.

### 4.1 기본자료

우리나라의 일 강수량자료는 1960년도 부터 주요 지점에 대해서 기상월보<sup>(8)</sup> 및 수문조사년보<sup>(9)</sup>에 수록되기 시작했으며, 대부분의 관측지점이 1965년경부터 일 강수량 자료를 보유하고 있다.

본 연구의 대상지점으로는 낙동강 유역의 대구, 고령, 밀양, 영주 관측소와 섬진강 유역의 하동, 순창, 구례 관측소를 택하였으며, 표 1에는 각 관측소들의 지형적 인자와 강수량 자료의 보유기간을 수록하였다. 그 중에서 대구 관측소는 다른 관측소에 비해 자료의 보유기간이 훨씬 길므로 개발된 일강수계열 모의발생모델의 검정을 위해서 전반부(1907~1948 : Tae Ku B) 자료를 바탕으로 모수를 추정하고 모의결과와 후반부(1949~1990 : Tae Ku A)를 비교하기로 한다. 그의 나머지 관측소의 자료 보유기간은 30년 미만 이므로 전 자료를 대상으로 모수를 추정하기로 한다.

### 4.2 강수발생과정

4.2.1 습윤계속기간과 건조계속기간간의 독립성 검증

건습 발생과정에 ARP 모델을 적용하기 위해서는 연속하는 습윤계속기간과 건조계속기간의 길이는 서로 독립이라고 가정한 2.1절의 기본가정이 성립 되어야 한다. 따라서 본 절에서는 인접하는 습윤계속기간과 건조계속기간의 길이간의 독립성을 확인 하기 위하여 양 계열의 단순상관계수  $r=0$ 에 관한 t분포 검정을 사용하였다.<sup>(10)</sup>

표 2는 t분포 검정에 의한 밀양관측소와 하동관

표 1. Characteristics of Stations Used in Analysis

River Basin	Items		The East Longitude	The North Latitude	Height (EL.m)	Recording Years
	Station					
Nakdong River	Taeku		128°37'	35°53'	57.8	'07-'90
	Koryung		128°16'	35°43'	60.0	'67-'91
	Milyang		128°47'	35°27'	10.0	'67-'91
	Youngju		128°37'	36°49'	150.0	'67-'91
Seomjin River	Hadong		127°45'	35°04'	20.0	'65-'91
	Soonchang		127°08'	35°22'	80.5	'65-'91
	Gurye		127°28'	35°12'	40.0	'65-'91

표 2. Independence Test between Wet and Dry Sequences at Milyang and Hadong Station

Month Stat.		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Mil Yang	r	0.08	-0.08	-0.05	0.09	0.03	0.06	-0.13	0.12	0.01	0.04	0.02	0.06
	DF	60	73	109	124	110	127	124	119	101	68	81	62
	t	0.66	0.68	0.49	0.96	0.31	0.66	1.47	1.37	0.09	0.35	0.18	0.46
	t <sub>c</sub>	2.00	2.00	1.98	1.98	1.98	1.98	1.98	1.98	1.99	2.00	1.99	2.00
Ha Dong	r	0.13	0.15	-0.06	0.07	0.13	-0.11	-0.07	0.15	0.04	-0.06	-0.12	-0.02
	DF	58	75	106	125	111	121	139	123	88	63	85	69
	t	1.02	1.27	0.63	0.74	1.39	1.19	0.78	1.70	0.40	0.46	1.12	0.20
	t <sub>c</sub>	2.00	1.99	1.98	1.98	1.98	1.98	1.98	1.98	1.99	2.00	1.99	2.00

cf) t<sub>c</sub>: critical value at significance level 5%, DF: degree of freedom

측소의 건습계속기간의 독립성에 대한 가설검정 결과를 수록한 것으로서, 표본에서 양자간의 상관계수가 아주 작아 귀무가설이 승인되므로 독립성이 인정됨을 알 수 있다. 따라서 강수발생과정에 ARP 모델을 적용할 수가 있음을 보여준다.

#### 4.2.2 습윤계속기간의 최적분포형

습윤계속기간의 길이에 대해 4가지의 이산형 분포를 적용하여  $\chi^2$ 값과 대수우도에 의거하여 최적분포형을 선정하였으며, 습윤계속기간에 적합시킨 TBD, TPD, TNBD, LSD의 분포형중에서 가장 적합도가 좋은 분포형을 표 3에 수록하였다.

그림 1은 밀양 관측소의 7월의 습윤계속기간 표본의 관측빈도와 추정된 분포의 기대빈도를 비교·도시한 것이다. 이 표 3과 그림 1에서 보면 전반적으로 TNBD가 가장 많은 표본에서 적합함을 보이고 있으며, TNBD 이외의 분포형도 혼합적으로 적합

되고 있음을 알 수 있다. 그 중 TBD가 가장 많은 표본에서, 그 다음에는 TPD, LSD의 순이었다. 또한 자료의 분산이 아주 작은 경우에는 TNBD에는 수렴하지 못하고 TPD가 적합한 것으로 알려져 있음을 고려할 때 TNBD군의 분포형이 낙동강 및 섬진강 유역의 습윤계속기간에 잘 맞는 것으로 생각된다.

#### 4.2.3 건조계속기간의 최적분포형

습윤계속기간의 길이에 적용한 4가지의 이산형 분포를 건조계속기간의 경우에도 적용하였으며, 건조계속기간에 적합시킨 TBD, TPD, TNBD, LSD의 분포형중에서 가장 적합도가 좋은 분포형을 표 3에 수록하였다.

표 3에서 보면 습윤계속기간의 경우와는 달리 단지 밀양, 순창과 구례의 7월의 경우에만 LSD가 가장 좋은 적합도를 보였을 뿐 나머지 모든 표본에서는 TNBD의 적합이 가장 좋음을 알 수 있다.

표 3. Best Fit to a Discrete Distributions

Stat.	Nakdong River Basin								Seomjin River Basin					
	Tae Ku		Ko Ryung		Mil Yang		Young Ju		Ha Dong		SoonChang		Gu Rye	
	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry
Jan.	TB	TN	LS	TN	TN	TN	TN	TN	LS	TN	LS	TN	TP	TN
Feb.	TP	TN	TB	TN	TP	TN	TB	TN	TN	TN	TN	TN	TN	TN
Mar.	TB	TN	TB	TN	TB	TN	TB	TN	LS	TN	TP	TN	TN	TN
Apr.	TB	TN	TB	TN	TB	TN	TP	TN	TN	TN	TN	TN	TN	TN
May	TP	TN	TP	TN	TB	TN	TP	TN	TN	TN	TN	TN	TB	TN
Jun.	TN	TN	TB	TN	TN	TN	TN	TN	LS	TN	TN	TN	TP	TN
Jul.	TN	TN	TN	TN	TN	LS	TN	TN	TN	TN	TN	LS	TN	LS
Aug.	TN	TN	TP	TN	TN	TN	TN	TN	TN	TN	TN	TN	TN	TN
Sep.	TN	TN	TN	TN	TN	TN	TP	TN	TN	TN	TN	TN	TN	TN
Oct.	TB	TN	TN	TN	TP	TN	TN	TN	TN	TN	TB	TN	TB	TN
Nov.	TN	TN	LS	TN	TN	TN	LS	TN	TB	TN	LS	TN	TN	TN
Dec.	TN	TN	LS	TN	TP	TN	TN	TN	TN	TN	LS	TN	LS	TN

cf) TB: TBD, TP: TPD, TN: TNBD, LS: LSD

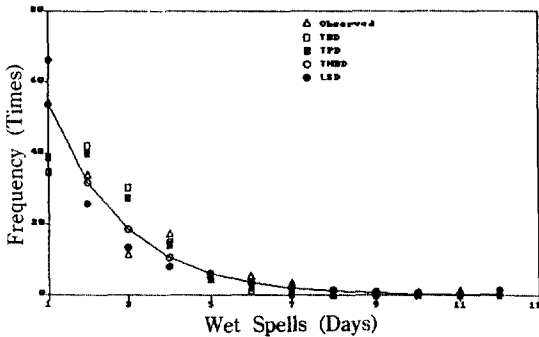


그림 1. Fitting to the TNBD for Wet Spells (Mil Yang-Jul.).

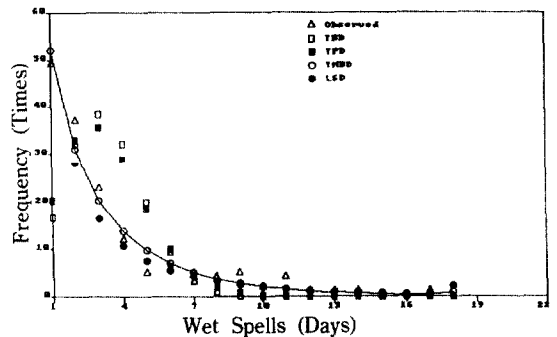


그림 2. Fitting to the TNBD for Dry Spells (Ha Dong-Jul.).

그림 2는 건조계속기간에 적합시킨 이산형 분포형의 결과를 도시한 것으로서, 하동관측소의 7월에 대한 TNBD를 도시하였다.

그림 2를 습윤계속기간에 대한 그림 1과 비교해보면, 건조계속기간에 대한 적합도가 약간 떨어짐을 알 수 있다. 이는 건조계속기간의 변량분포가 습윤계속기간에 비해 광범위하고, 계속기간의 길이가 증가함에 따라 실적자료의 발생빈도가 반드시 감소하고 있지 않는 반면에 이론적인 분포형은 감소분포이기 때문이다. 따라서 건조계속기간의 불규칙성은 습윤계속기간에 비해 훨씬 더 심함을 알 수 있다.

#### 4.2.4 강수발생과정의 모의발생

앞절에서 얻어진 건조계속기간의 최적 분포형에 의거하여 2.3절에 기술한 방법으로 각 관측소의 자료보유기간의 5배에 해당하는 기간동안의 강수발생 상황을 모의발생시켜 초기치의 영향을 고려하여 앞부분의 1/5을 제거하고 관측계열과 비교하였다.

건조계속기간과 습윤계속기간은 이산형 변량이므로 관측빈도 또는 모의발생빈도가 0인 경우가 발생하기 때문에  $\chi^2$  형태의 값을 이용한 적합도 판단은 불가능하다. 그러므로 관측계열과 모의발생 계열과의 일치도를 파악하기 위해 RMSE(root mean squa-

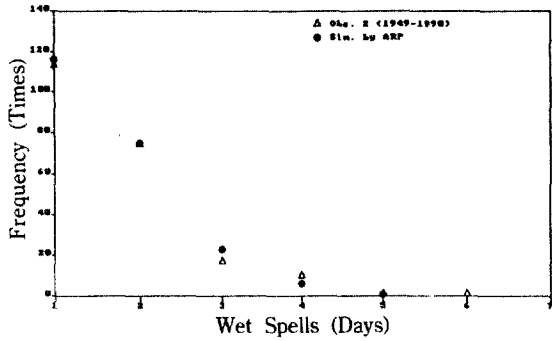


그림 3. Comparison of Observed and Simulated Frequency by ARP Model (Wet Spells, Tae Ku A-Apr.).

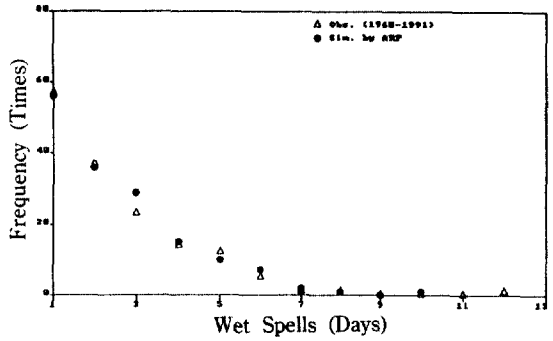


그림 4. Comparison of Observed and Simulated Frequency by ARP Model (Wet Spells, Gu Rye-Jul.).

res error)를 이용하였다.<sup>(11,12)</sup>

그림 3~4는 각각 대구 관측소(4월)와 구례 관측소(7월)의 ARP 모델에 의한 습윤계속기간 계열의 결과를 비교한 것으로서 관측계열과 모의발생 계열은 잘 일치하고 있다. 대구 관측소의 결과인 그림 3과 구례 관측소의 결과인 그림 4를 비교해 볼 때 다소 차이가 보이는데 이는 대구 관측소의 경우는 전반부자료(Tae Ku B)를 기본자료로 하여 모수를 추정 한 후, 모의발생자료와 비교를 한 관측치는 후반부 자료(Tae Ku A)이었기 때문에 다른 관측소 보다 편차가 다소 컸으나 비교적 잘 맞고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과를 통해서 볼 때 ARP 모델에 의한 강수발생과정은 건습계속기간의 길이가 긴 부분에서도 잘 맞고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 갈수기 또는 한발의 예측이 가능함을 시사하고 있다.

### 4.3 습윤일의 강수량

#### 4.3.1 연속사상간의 독립성 검증

습윤일의 강수량에는 종종 작은 값의 계열상관이 있으나 종속성이 있다고 보기에는 무리가 많다. 여기에서는 습윤일의 강수량을 random하게 발생시킬 수 있는가를 검토하기 위하여 기본가정으로 한 연속사상간의 독립성을 계열상관을 구해 유의성 검정을 하였으며, 독립성 검증에는 1차 계열상관계수  $\gamma_1$ 에 관한 Anderson의 유의성 검정을 이용하였다.<sup>(13)</sup>

계열상관계수의 분포는 대부분 0~0.2 정도로 95% 신뢰한도내에 분포하고 있었으며, 순창 관측소의 7월의 표본결과를 도시한 것이 그림 5로서 신뢰한

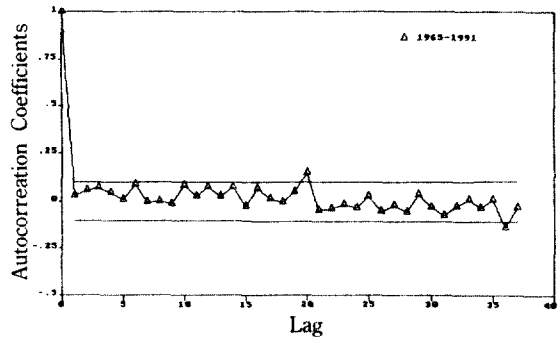


그림 5. Correlogram of Precipitation Amounts on the Wet Day (Soon Chang-Jul.).

도내에 위치하고 있어 모두 독립성이 인정됨을 알 수 있다.

#### 4.3.2 연속확률분포형의 적합

습윤계속기간내의 강수량 분포를 기술하기 위해 연속확률분포인 Gamma 분포, Pearson Type-III, Type-III 극치분포, 3모수 Weibull 분포를 적용하였으며, 각 분포형에 대한 축척모수, 형상모수, 위치 모수를 모멘트법과 최우추정법에 의해 추정하였다.

Gamma 분포계열의 모수에 대한 최우추정에는 Thom의 방법과 Greenwood와 Durand의 방법을 사용하였으며, 양자간의 결과는 거의 비슷하였으나 후자의 방법이  $\chi^2$  적합도가 약간 좋았다. 따라서 Gamma 분포의 모수에 대한 최우추정치로는 Greenwood와 Durand의 방법에 의한 결과를 채택하였고, 모멘트법에 의해 구한 모수추정치와 비교하여 적합도가 좋은 것을 사용하였다. Weibull 분포계열의



표 4. Best Fit to a Continuous Distribution for the Precipitation Amounts on the Wet Day

Basin	Nakdong River Basin				Seomjin River Basin		
	Tae Ku	Ko Ryung	Mil Yang	Young Ju	Ha Dong	Soon Chang	Gu Rye
Jan.	T3E	PT3	3-Weibull	Gamma	3-Weibull	PT3	T3E
Feb.	Gamma	PT3	3-Weibull	T3E	Gamma	T3E	PT3
Mar.	Gamma	3-Weibull	Gamma	PT3	Gamma	Gamma	T3E
Apr.	Gamma	T3E	PT3	PT3	PT3	Gamma	T3E
May	PT3	Gamma	Gamma	PT3	PT3	Gamma	T3E
Jun.	PT3	Gamma	T3E	PT3	T3E	T3E	Gamma
Jul.	PT3	PT3	PT3	T3E	Gamma	Gamma	T3E
Aug.	Gamma	T3E	Gamma	PT3	PT3	Gamma	PT3
Sep.	Gamma	PT3	T3E	PT3	T3E	Gamma	T3E
Oct.	T3E	PT3	T3E	PT3	PT3	T3E	PT3
Nov.	T3E	PT3	PT3	PT3	T3E	T3E	T3E
Dec.	PT3	Gamma	T3E	T3E	Gamma	PT3	T3E

모수는 최우추정치와 모멘트법에 의해 구한 모수추정치와 비교하여 적합도가 좋은 것을 사용하였다.

본 연구에서 적용한 4가지 연속확률분포형중에서 가장 적합도가 좋은 분포형을 표 4에 수록하였으며, 이 표에서 보면 낙동강 유역의 경우는 PT3, T3E, Gamma, 3-Weibull 분포의 순으로, 섬진강 유역의 경우는 T3E, Gamma, PT3, 3-Weibull 분포의 순으로 최적적합수가 많았고, 2모수 분포가 3모수 분포 보다 적합도가 다소 좋게 나타났으며, Gamma 분포(2모수)와 2모수 Weibull 분포(T3E)의 적합 비율은 비슷하였다.

그림 6은 구례 관측소의 7월의 관측표본과 적합시킨 4가지 연속확률분포의 빈도분포를 비교한 것이다. 전반적으로 강수량이 작은 쪽에서는 Weibull 분포가 Gamma 분포 보다 양호한 적합도를 보였다.

#### 4.4 강수계열 모의발생 모델의 검정

본 절에서는 일 강수계열의 모의발생 모델을 구성하기 위하여 강수발생과정에 적용했던 ARP 모델과 습윤일의 강수량과정에 적합한 것으로 파악된 2모수 Weibull 분포 및 Gamma 분포를 조합하여 구성하였으며, 그 절차는 그림 7과 같다.

이와 같이 일 강수계열의 모의발생을 위해 조합한 A-W, A-G의 2가지 모델을 사용하여 낙동강과 섬

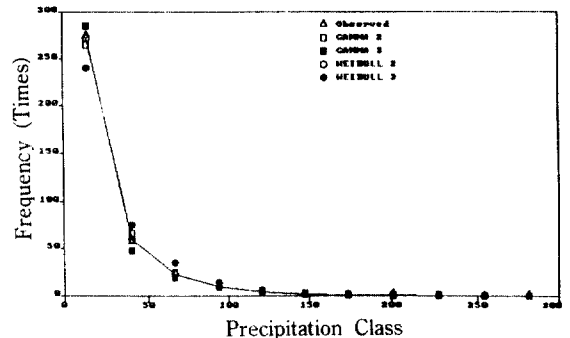


그림 6. Fitting to the Continuous Distributions for the Precipitation Amounts on the Wet Day (Gu Rye-Jul.).

진강 유역의 7개 관측소에 대한 일 강수계열을 모의발생 하였으며, 모의발생은 자료보유기간의 5배에 해당하는 기간동안의 일 강수계열을 모의발생한 후 초기의 1/5에 해당되는 모의자료는 초기치의 영향을 고려하여 제거하였다. 모의발생 모델의 검정을 위해 검사접근방법(inspection approach)의 대상 통계량으로는 월(연)평균 강수일수, 월(연)평균 강수량과 표준편차 및 건습계속기간의 득수를 택하여 비교하였다.

##### 4.4.1 강수일수

표 5는 낙동강유역 관측소의 월별 및 연간의 강수

<강수발생과정>

<습윤일의 강수량 과정>

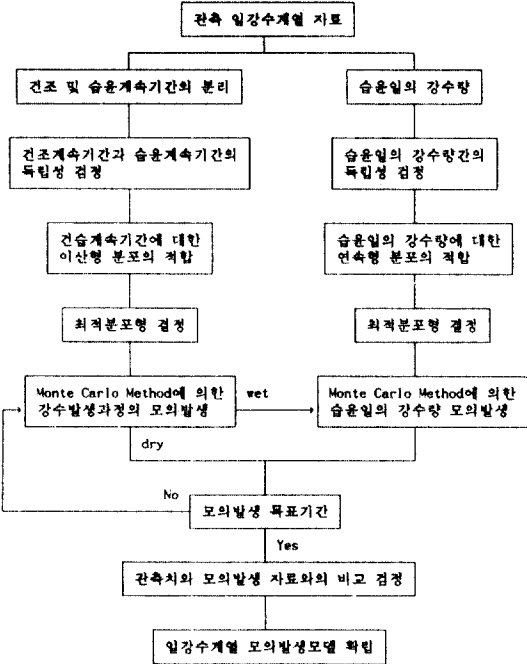


그림 7. Flow Diagram for Daily Precipitation Series Model I.

발생일수를 비교하기 위하여 관측자료와 ARP 모델의 결과를 수록한 것이다. 표 5에서 보면, 대구 관측소는 낙동강 유역의 다른 관측소 보다 연강수일수가 많으나 강수량은 상대적으로 적은 특징을 보여주고 있다. 또한 월별 및 연간의 총 강수 발생일수는 모든 관측소에서 ARP 모델의 결과가 관측자료와 비슷한 값을 보이고 있으며, 대구, 밀양, 영주 관측소에서는 A-W 모델이 보다 적합하고 고령 관측소에서는 A-G 모델이 보다 적합함을 알 수 있다.

#### 4.4.2 건조계속기간과 습윤계속기간

그림 8~9는 2개의 모의발생 모델을 이용하여 모의발생한 자료와 실적치간의 습윤 및 건조계속기간의 빈도분포를 일부 도시한 것이다.

그림 8은 대구 관측소의 8월에 대한 습윤계속기간의 실적치와 모의발생치를 비교·도시한 것으로서 잘 맞고 있으며, 그림 9는 하동 관측소의 7월에 대한 건조계속기간의 실적치와 모의발생치를 비교·도시한 것으로서 서로 잘 적합하고 있음을 알 수 있다.

#### 4.4.3 강수량

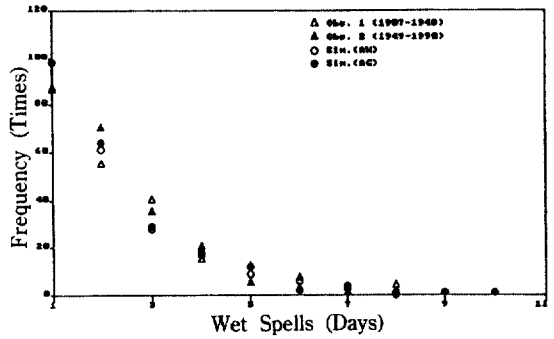


그림 8.1 Comparison of Observed and Simulated Frequency on Wet Spells (Tae Ku-Aug.).

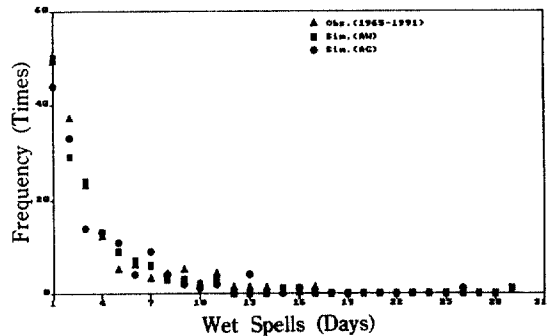


그림 9. Comparison of Observed and Simulated Frequency on Dry Spells (Ha Dong-Jul.).

그림 10과 11은 각 모델에서 얻어진 모의발생 결과에 대한 월평균 강수량과 관측 월평균 강수량을 비교 도시한 것이며, 그림 12와 13은 표준편차를 비교한 것이다.

그림 10은 낙동강 유역의 대구 관측소에 대한 월평균 강수량을 관측치와 2개 모델에 의한 모의발생치에 대해 도시한 것으로서, 2개 모델의 실적치에 대한 적합도는 좋은 일치를 보이고 있다. 9월의 경우에 A-W 모델이 약간의 과다를 보이는 것 외에는 모두 관측치의 특성을 잘 재현하고 있다. 그림 11은 삼진강 유역의 구례 관측소에 대한 월평균 강수량을 관측치와 2개 모델에 의한 모의발생치에 대해 도시한 것으로서, 2개 모델의 실적치에 대한 적합도는 좋은 일치를 보이고 있다. 7월의 경우에 A-G 모델이 약간의 과다를 보이는 것 외에는 모두 관측치의 특성을 잘 재현하고 있다.

그리고 그림 12와 13은 각각 낙동강 유역의 대구 관측소와 삼진강 유역의 구례 관측소의 월 강수량에

표 5. Average Number of Wet Days (The Nakdong River Basin)

(Unit: Times)

Stat.	Tae Ku			Ko Ryung			Mil Yang			Young Ju		
	Month	Obs.	A-W	A-G	Obs.	A-W	A-G	Obs.	A-W	A-G	Obs.	A-W
Jan.	3.9	5.0	5.1	3.9	4.9	5.0	3.5	4.9	3.6	4.1	4.1	3.8
Feb.	4.6	5.0	4.7	4.2	5.1	4.6	4.8	5.6	5.0	4.7	4.6	5.4
Mar.	7.2	6.9	7.7	5.8	6.6	6.2	6.4	6.5	6.8	5.8	6.1	5.7
Apr.	8.4	8.7	8.7	7.0	7.3	7.9	7.8	8.5	8.2	6.6	7.2	7.6
May	8.8	8.5	9.0	7.0	7.3	7.2	6.8	7.3	7.1	7.3	6.7	6.2
Jun.	11.4	10.9	10.6	8.9	8.9	9.1	9.1	9.4	9.5	8.8	8.8	9.3
Jul.	13.3	12.5	12.6	12.2	12.7	12.3	12.2	11.6	13.0	12.4	12.9	11.8
Aug.	12.6	11.5	12.0	9.7	10.7	9.4	9.9	9.1	9.5	11.3	10.7	12.2
Sep.	10.4	10.8	9.5	7.9	7.4	8.5	8.1	8.7	7.8	7.3	7.3	7.5
Oct.	5.7	5.7	5.2	4.0	4.6	4.2	4.3	4.6	5.2	4.4	4.7	5.0
Nov.	6.7	6.3	5.5	4.4	4.8	3.8	4.6	4.7	4.6	5.4	5.1	5.4
Dec.	5.7	4.7	5.7	3.1	3.2	3.8	3.4	3.3	4.3	4.5	5.0	4.2
Total	98.7	96.5	96.3	78.1	83.5	82.0	80.9	84.2	84.6	82.6	83.2	84.1

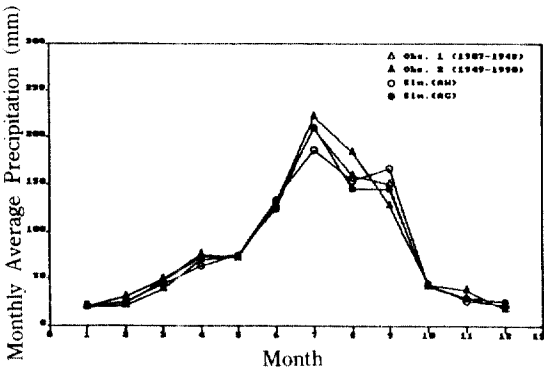


그림 10. Comparison of Observed and Simulated Average Monthly Precipitation (Tae Ku).

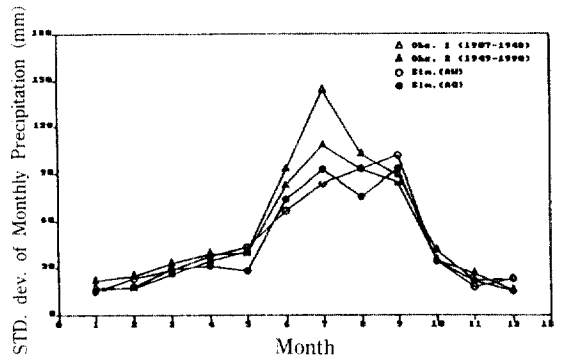


그림 12. Comparison of Observed and Simulated Standard Deviation for Monthly Precipitation (Tae Ku).

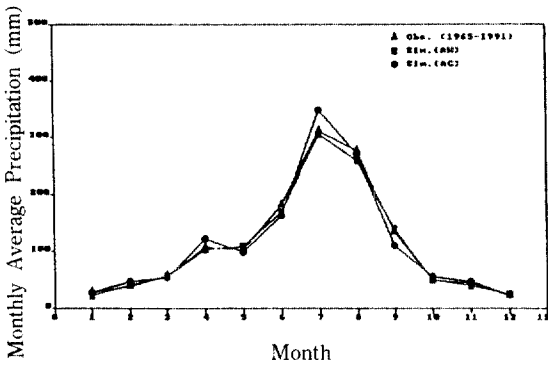


그림 11. Comparison of Observed and Simulated Average Monthly Precipitation (Gu Rye).

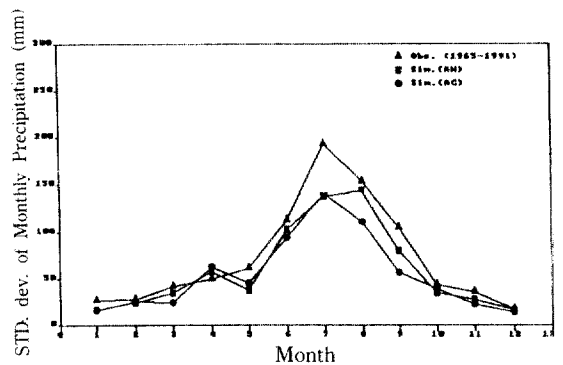


그림 13. Comparison of Observed and Simulated Standard Deviation for Monthly Precipitation (Gu Rye).

대한 표준편차를 비교한 것이다. 이 그림에서 보면, 모의발생 결과의 표준편차는 실측자료의 표준편차보다 약간 작은 값을 보이면서 월별 경향은 거의 그대로 재현하고 있음을 알 수 있다. 실측자료의 통계적 특성에 바탕을 둔 추계학적 모의발생 모델에서는 일반적으로 극치발생의 결여로 보통 표준편차가 약간 과소하게 나타나고 있으며, 본 연구에서도 역시 그러한 경향을 확인할 수 있었다.

이들 그림으로부터 강수량을 기준으로 하여 가장 적합하다고 사료되는 모델을 선정하면, 낙동강 유역의 대구관측소는 A-G 모델이, 고령관측소는 A-W 모델이, 밀양관측소는 A-G 모델이, 영주관측소는 A-W 모델이 선정되었으며, 섬진강 유역의 하동관측소는 A-W 모델이, 순창관측소는 A-W 모델이, 구례관측소는 A-G 모델이 선정되었다.

## 6. 결 론

본 연구에서 얻어진 일 강수계열 모델을 낙동강 유역의 대구, 고령, 밀양, 영주 관측소와 섬진강 유역의 하동, 순창, 구례 관측소 등에 적용하여 그 적합성을 확인하였으며, 얻어진 성과를 요약하면 다음과 같다.

① 우리나라 간헐 강수계열의 모의발생 모델을 개발 제시하였다.

② 우리나라의 건조계속기간은 절단음이항분포(TNBD)를 이루고 있으며, 습윤계속기간은 여름철의 경우에는 TNBD가 적합하였고, 그 외에는 TPD, TBD, LSD의 순으로 복합적인 상태로 적합하였다.

③ 습윤일의 강수량에 관한 확률분포형은 Type-III 극치분포(2모수 Weibull 분포)와 Gamma 분포가 적합하였으며, Type-III 극치분포(2모수 Weibull 분포)의 경우가 다소 양호하였다.

④ 2가지의 일 강수계열 모델(A-W, A-G model)의 모의발생 결과는 실측자료 계열의 통계적 특성과 건습계속기간 등을 잘 재현하였으며, 유역이나 관측소의 특성에 따른 단일모델의 결과를 보이지 않고 모두 비슷한 수준의 좋은 적합도를 보여 2가지의 일 강수계열 모의발생 모델의 적용성을 확인하였다.

본 연구의 모형으로 발생하는 일강수계열은 일단위의 일출력 해석이 가능한 장기유출해석 모형이

확립되어 있을 경우에 그 입력으로 사용할 수 있을 것이며, 장기유출해석을 위해서는 입력 강우, 증발 및 침투 등에 의한 손실, 지하수 유출, 지표수 유출 등을 모두 고려한 물수지 방정식에 의거한 방법 등이 고려되어야 할 것이다. 이러한 장기유출해석모형이 확립되어 있을 경우 본 연구를 통해 발생하는 일강수계열을 입력자료로 사용하므로써 장기유출패턴을 파악하고, 그 결과를 수자원계획 수립시의 기초자료 등으로 활용할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 1992년도 한국과학재단 일반기초연구 [과제번호: 921-1300-010-1], '간헐 수문과정의 모의발생 모델 - 일강수계열을 중심으로-'의 연구성과의 일부분임을 밝히며, 동 재단의 배려에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Finney, D.J., "The Truncated Binomial Distribution", *Ann. Eugenics*, Vol. 14, 1949, pp. 319-328.
2. Mckendrick, A.G., "Applications of Mathematics to Medical Problems", *Proc. Edinburgh Math. Soc.*, Vol. 44, 1926, pp. 98-130.
3. Sampford, M.R., "The Truncated Negative Binomial Distribution", *Biometrika*, Vol. 42, 1955, pp. 58-69.
4. Fisher, R.A., A.S. Carbet, and C.B. Williams, "The Relation between the Number of Species and the Number of Individuals in a Random Sample of an Animal Population", *Jour. Animal Ecology*, Vol. 12, 1943, pp. 42-57.
5. Law, A.M. and W.D. Kelton, *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1982, pp. 240-278.
6. Thom, H.C.S., "A Note on the Gamma Distribution", *Mon. Weath. Rev.*, Vol. 86, No.4, 1958, pp. 117-122.
7. Greenwood, J.A. and D. Durand, "Aids for Fitting the Gamma Distribution by Maximum Likelihood", *Technometrics*, Vol. 2, No.1, 1960, pp. 55-65.
8. 중앙기상대, 『기상월보』, 1965-1985.
9. 건설부, 『한국수문조사년보』, 1965-1985.
10. Hahn, G.J. and S.S. Shapiro, *Statistical Models in*

*Engineering*, John Wiley and Sons, New York, 1967.

11. 이재준, 강수계열의 모의발생 모델 개발, 연세대학교 대학원, 공학박사 학위논문, 1987.
12. 이재준, 이정식, "ARP와 연속확률분포를 이용한 일강수계열의 모의발생", 1992년도 대한토목학회

학술발표회 개요집(II), 1992, pp. 147-151.

13. Benjamin, J.R. and C.A. Cornell, *Probability, Statistics, and Decision Theory for Civil Engineers*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1970.

(接受 : 1993. 8. 31)