

강수계열의 상태분류에 의한 Markov 연쇄 모의발생 모형 Markov Chain Model for Synthetic Generation by Classification of Daily Precipitation Amount into Multi-State

김 주 환* · 박 찬 영** · 강 관 원***
Kim, Ju Hwan · Park, Chan Young · Kang, Kwan Won

Abstract

The chronical sequences of daily precipitation are of great practical importance in the planning and operational processes of water resources system. A sequence of days with alternate dry day and wet day can be generated by two state Markov chain model that establish the subsequent daily state as wet or dry by previously calculated conditional probabilities depending on the state of previous day. In this study, a synthetic generation model for obtaining the daily precipitation series is presented by classifying the precipitation amount in wet days into multi-states. To apply multi-state Markov chain model, the daily precipitation amounts for wet day are rearranged by grouping into thirty states with intervals for each state. Conditional probabilities as transition probability matrix are estimated from the computational scheme for stepping from the precipitation on one day to that on the following day. Statistical comparisons were made between the historical and synthesized characteristics of daily precipitation series. From the results, it is shown that the proposed method is available to generate and simulate the daily precipitation series with fair accuracy and conserve the general statistical properties of historical precipitation series.

요 지

수자원의 주공급원인 강수는 현상의 발생여부에 따라 건조일과 습윤일이 교대로 반복되는 과정으로 구성되어 있으며 특히, 일강수계열의 습윤일에 발생하는 강수량의 크기는 매우 다양한 형태를 지니고 있어 이 과정을 모형화 하는데는 복잡한 확률과정이 수반된다. 본 연구

* 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원
** 인하공업전문대학 토목과 교수
*** 인하대학교 토목공학과 명예교수

에서는 일강수계열의 발생과정을 건조일·습윤일로 구분하고 습윤일의 강수량을 상태별로 분류하여 각 상태별 천이확률을 계산함으로써 이를 장래에 발생 가능한 강수사상의 모의발생에 이용하였다. 본 모형은 수문사상의 발생과 비발생만을 구분하던 2-state Markov 연쇄모형에 강수의 발생시 강수량의 크기에 따라 상태를 여러 개로 구분하여 강수량을 추정할 수 있도록 수정한 것으로 간헐 수문사상인 일강수계열의 구성성분인 건조일과 습윤일, 건조·습윤 지속기간 및 습윤일의 강수량을 Markov 연쇄에 의해 동시에 발생시킬 수 있도록 한 것이며 다른 모형에 비해 사용이 비교적 용이하다. 본 연구에서 제안한 multi-state Markov 연쇄모형의 적용 가능성을 검토하기 위하여 비교적 장기간의 자료를 보유하고 있는 관측소의 강수 자료를 이용하였으며 그 결과를 강수량, 건조·습윤일수 및 건조·습윤계속기간의 분포를 실제 자료와 비교하여 모형의 적합도를 평가하였다. 이를 토대로 홍수 및 한발기간의 추정과 모의발생에 의한 자료 확장으로 중장기 수자원 계획 및 운영에 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

.....

1. 서 론

중장기 각종 용수확보와 수자원의 개발 및 이용을 위해서는 장기간에 걸친 하천유황의 파악과 예측을 기초로 계획수립이 이루어지기 때문에 하천유출량의 직접적인 공급원인 강수계열에 대한 충분한 양의 자료확립이 요구된다. 강수계열은 강우 및 가뭄의 지속기간과 강수현상에 의해 수반되는 강수량으로 구성된다. 또한 강수사상의 발생으로 구분되는 건조·습윤지속기간에 관한 사전정보는 홍수 및 한발의 영향에 따른 수자원 시스템의 효율적인 운영과 계절별 농업용수 공급계획수립 등과 같은 수자원의 계획수립 및 용수공급체계의 개선을 위하여 필요하며 건조·습윤일 및 강수량 등 강수계열에 관련된 자료의 분석을 통하여 이루어진다(이재준, 1986).

따라서, 본 연구에서는 간헐 수문사상인 일 강수과정의 추계학적 해석을 통하여 강수사상이 시간에 따라 어떤 과정으로 변화되어 가는지에 대한 상태를 확률적으로 분석하여 강수량, 건조·습윤일수, 건조·습윤 지속기간(Run Length) 등 강수계열의 기본자료를 추정하고자 하는데 목적이 있다. 이를 위하여 간헐 수문사상인 일강수사상을 대상으로 수문자료계열의 모의발생에 널리 이용되고 있는 Markov 연쇄이론을 응용하여 강우의 크기에 따른

상태별로 설정하고 건조일과 습윤일의 반복과정과 습윤일의 경우에 수반되는 강수량을 함께 발생시킬 수 있는 단일모형을 구축하고자 하며 그 결과를 수문계의 강수계열 예측을 위한 자료로 사용할 수 있도록 일 강수사상의 모의발생모형을 확립하고 그 적용 가능성을 제시하고자 한다.

2. 모형의 구성

2.1 일 강수계열의 구조

일 강수계열은 Fig. 1(b)와 같이 건조기간과 습윤기간이 교대로 계속되는 연속계열로 이루어져 있으며 습윤일에는 강수량이 발생하는 계열로 구성되어 있다.

Fig. 1에서 D_1, D_2, D_3, \dots 는 건조일의 지속기간을 의미하며, W_1, W_2, W_3, \dots 는 습윤일의 지속기간을 의미하고 R_1, R_2, R_3, \dots 는 습윤일이 계속되는 동안에 발생한 강수량이다. 습윤일의 정의는 양(+)의 강수량을 기록한 날로 정의할 때 이슬이나 안개 등과 같이 극히 작은 량에 의해서도 초래될 수도 있다. 이러한 문제를 피하기 위하여 어떤 기준이 되는 강수 기록량(threshold or trace)보다 작은 날을 건조일로 할 수 있으며 이는 수문학적 무강우의 기준치인 0.1mm/day 이하를 건조일로 가정할 수 있다. 또한 건조 계속기간이라 함은 어

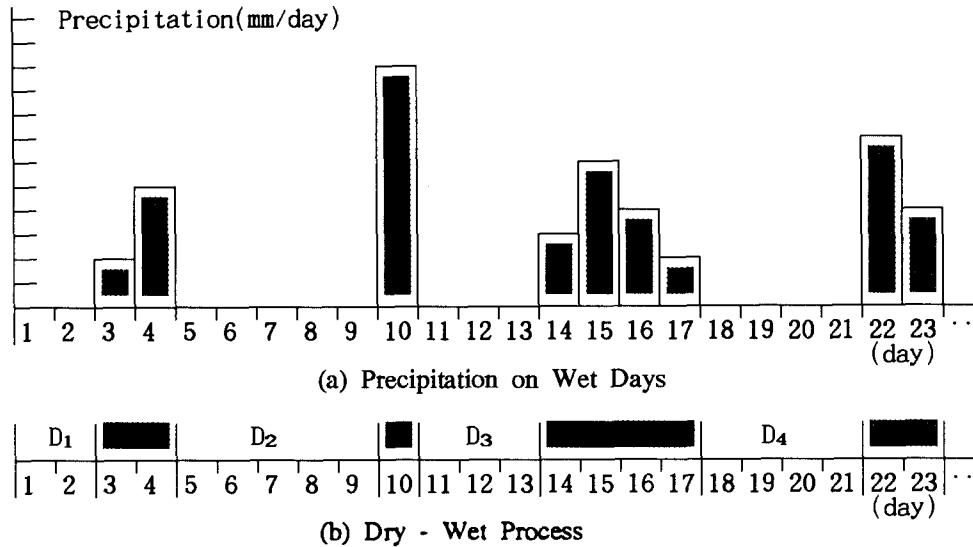


Fig. 1. Structure of Daily Precipitation Series

면 기간의 모두 양쪽이 습윤일로 제한되는 기간으로 정의하며 이와 동일한 방법으로 습윤 계속기간은 양쪽이 모두 건조일로 제한되는 기간으로 정의할 수 있다.

강수량 자료의 모의발생 방법은 자료계열을 형성하는 각각의 수문량이 특정한 확률분포형에 따르며 분포되며 각각 독립적으로 발생한다는 가정에 근거한 무작위 발생방법과 자료계열을 형성하는 개개 값은 서로 독립적이지 않으나 의존적으로 앞의 값이 뒤의 값에 영향을 미친다고 가정하는 자기회귀형 발생방법으로 나눌 수 있다. 이 방법중 어느 방법을 선택하는가에 대한 기준은 자료계열의 수문학적 지속성 여부에 달려 있다. 본 연구에서의 1차 Markov 연쇄모형은 강우계열의 1차 종속성을 기초로 기술한 것으로서 강우가 발생한 날과 발생하지 않은 날을 확률적으로 구분하고 이를 토대로 상태공간에서 천이해 나가는 과정으로 설명할 수 있다.

2.2 Markov 연쇄모형

강우계열을 이루고 있는 구성성분을 가장 간단한 방법으로 분리한다면, 건조일 및 습윤일 그리고 습

윤일 동안에 발생된 강수량이라할 수 있다. 이같은 구성성분을 고려한 가장 간단한 모의발생 모형을 구축하기 위해서는 일 강우계열을 강우가 발생하지 않은 날(건조일)과 발생한 날(습윤일)의 2가지 상태로 보고 일 강우계열을 습윤일과 건조일만의 상태 2의 계열로 재구성하여 관측된 건조일과 습윤일의 상태변화를 바탕으로하여 천이확률을 얻어 분석하게 된다(Haan, 1976).

일강우의 발생과정을 건조일과 습윤일만의 2가지 상태를 지닌 1차 Markov 연쇄이론을 이용하여 표현하기 위해서는 현재의 시점을 기준으로 전날의 강우발생여부에 따라 두가지 상태, 즉 강우의 발생 또는 비발생에 따라 다음의 조건부 확률로 기술할 수 있다(Weiss, 1964).

$$\begin{aligned} \text{Probability}[\text{wet day/previous day wet}] &= 1-\beta \\ \text{Probability}[\text{wet day/previous day dry}] &= \alpha \\ \text{Probability}[\text{dry day/previous day wet}] &= \beta \\ \text{Probability}[\text{dry day/previous day dry}] &= 1-\alpha \end{aligned}$$

여기서 α 는 건조일이 있을 후 습윤일이 발생할 확률이고, β 는 습윤일이 있을 후 건조일이 발생할 확률로서 각각 0과 1사이의 값을 갖는다. 이를 행렬

Table 1. Transition Probability Matrix of 1st order 2-State Markov Chain

t-1(day) \ t(day)	Dry	Wet
Dry	$1-\alpha$	α
Wet	β	$1-\beta$

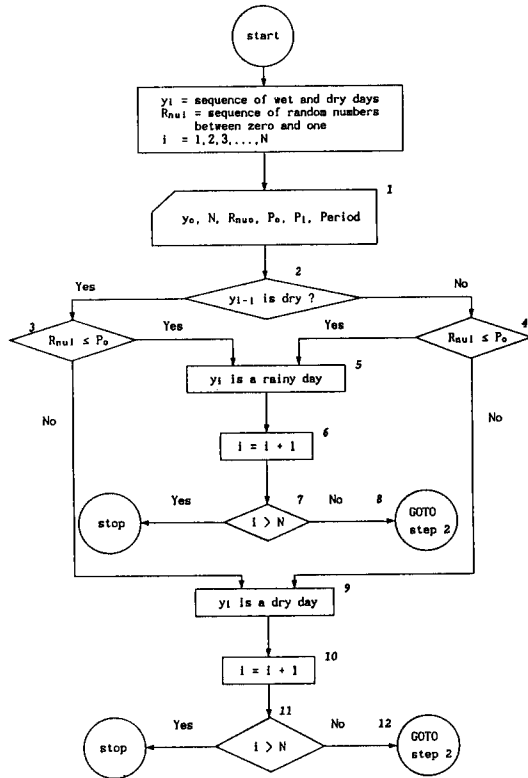


Fig. 2. Flow Diagram to Generate the Sequences of Wet and Dry Days

형태의 천이확률로서 표현하면 Table 1과 같다.

이와같은 상태-2의 천이확률에 바탕을 둔 모의 발생모형은 2가지 상태의 강수계열인 건조 및 습윤일만을 모의발생하게 되므로 습윤일에 발생하는 강수량 추정치를 얻기 위하여 또 다른 모형으로서 연속확률분포 모형을 이용하게 된다.

만일, 건조일과 강수가 있는 습윤일인 2개의 상태로만 나누었을 경우, α 값과 β 값을 이용한 건습 계열을 모의발생은 (0,1) 사이의 균등분포난수, R

를 발생시켜 α 또는 β 값과 비교함으로써 바로 전날의 상태에 따른 천이가 이루어짐으로써 수행되며 이 과정을 시간에 따라 연속적으로 진행시켜가는 것이 상태-2의 Markov연쇄에 의한 모의발생 과정이다(Srinivasan과 Gomes, 1988). 이 과정을 그림으로 표시하면 Fig. 2와 같다.

3. 상태분류에 의한 Markov 연쇄모형

일 강수계열의 구조적 특성을 고려하여 강수계열의 구성 성분인 건조계속기간, 습윤계속기간 및 습윤일의 강수량을 모형화하기 위하여 건조일과 습윤일 및 강수량 분포에 대하여 적절한 확률적 정의가 필요하다. 그러나 일강수계열을 확률분포로 나타내기에는 상당히 복잡하기 때문에 건조·습윤계속기간 계열을 나타내기 위한 이산형 강수발생 과정인 건조·습윤일 과정과 습윤일의 강수량 발생 과정으로 각각 나누어 해석하는 것이 일반적인 추세였다(Nord, 1975; Kang, 1987). 그러나, Markov 연쇄를 이용할 경우 강수계열을 건조일 및 습윤일의 두가지 상태로 보고 이 두 상태의 변화를 Markov 연쇄의 천이확률로서 표현하여 건조일 및 습윤일 계열을 추정하며 강수량의 발생은 연속확률분포에 의한 모의모형으로 부터 추정할 수 있다(Caskey, 1963; Adamowski와 Smith, 1972; Haan 등, 1976). 이러한 건조·습윤일 발생 과정과 강수량 모의발생 과정으로 두 가지 단계를 걸친 모형화 방법이 일반적이었다.

본 연구에서는 대상지점의 해당기간동안 강우의 발생여부에 관계없이 Markov 연쇄의 상태로 선정하고 대상기간 동안에 발생한 강수량의 상태변화를 천이확률에 의해 구성함으로써(Khanal과 Hamrick, 1974) 건조·습윤일수 및 강수량 등을 일괄적으로 추정할 수 있도록 하였다. 여기서 건조·습윤일 및 강수량을 함께 발생시키기 위한 Markov 연쇄모형의 차수는 1차에 한하였고 강수 상태의 수는 강수발생 유무인 상태-2, 즉 건조일과 습윤일을 기본으로 하고 실제 강수량의 크기를 가능한 한 근사하게 표현할 수 있도록 강수량의 크기별 강수의 발생빈도와 강수량의 크기를 고려하여 강수량을 상태-30으로 세분화시켰으며, 서울

(1908~1992), 부산(1905~1992), 대구(1909~1992), 목포(1906~1992) 지점의 일강수량자료로 대상으로 본 연구에서 제안하고 있는 모형의 적용성을 평가토록 하였다. 또, 대상지점의 강수량자료의 재구성을 토대로 이들 두 모형으로부터 계산되는 모의발생 대상기간 동안의 건조일수, 습윤일수 및 건조계속일 수, 습윤계속일 수 그리고 습윤일의 강수량, 상태별 강수의 발생빈도를 계산하여 실측자료와 비교하여 그들의 통계적 특성을 비교함으로써 분석 평가토록 한다.

3.1 강수량자료의 재구성

상태-2의 Markov 연쇄모형을 이용할 경우 습윤일이 발생되면 그 습윤일에 해당되는 강수량을 다시 추정하여야 하는 복잡한 과정을 거쳐야 함은 전술한 바와 같다. 이러한 2단계에 걸친 강수계열의 발생과정을 보다 간편하고 실제 강수사상을 거의 비슷하게 재현할 수 있는 강수계열을 얻기 위해서는 건조일 및 습윤일 뿐만 아니라 강수량까지도 동시에 발생시킬 수 있는 보다 간편하고 정확한 단일 모형의 개발이 바람직하다. 따라서 실측 강수계열의 건조 및 습윤일은 단 2가지 상태 즉, 무강수와 강수로 그 상태가 명확히 구분되나 습윤일에 발생하는 강수량의 크기는 대단히 다양하고 그 편차도 크며 계절적으로도 차이가 있어 실제 강수량을 사실 그대로 입력하는 것은 어려움이 있지만 가능한 일강수량의 크기를 세분하여 근사값을 취함으로써 일강수계열의 특성을 반영하도록 표현하였다. 이를 위하여 습윤일 동안의 강수량의 크기를 각 상태로 구분하여 실측 강수량자료를 재구성하여 이를 여러 상태로 변환시켰으며 본 연구에서는 Table 2와 같이 건조일과 습윤일을 포함하여 30가지의 상태로 구분하였다.

Table 3은 서울 관측소에서 관측된 자료기록년 동안의 7월1일부터 31일까지의 일강수량을 Table 2에 의하여 상태를 분류한 결과를 예시한 것이다. Table 3과 같이 자료기간 동안 각 상태별 빈도를 파악하여 일강수량의 크기에 따라 상태를 구분함으로써 강수량계열을 재구성할 수 있다.

Table 2. State Grouping of the Each Interval for Daily Precipitation

Precipitation Interval(mm)	State	Classification
$S1 \leq 0.1$	1	Dry
$0.1 < S2 \leq 5.0$	2	Wet
$5.0 < S3 \leq 10.0$	3	Wet
$10.0 < S4 \leq 15.0$	4	Wet
$15.0 < S5 \leq 20.0$	5	Wet
$20.0 < S6 \leq 25.0$	6	Wet
$25.0 < S7 \leq 30.0$	7	Wet
$30.0 < S8 \leq 35.0$	8	Wet
$35.0 < S9 \leq 40.0$	9	Wet
$40.0 < S10 \leq 45.0$	10	Wet
$45.0 < S11 \leq 50.0$	11	Wet
$50.0 < S12 \leq 55.0$	12	Wet
$55.0 < S13 \leq 60.0$	13	Wet
$60.0 < S14 \leq 65.0$	14	Wet
$65.0 < S15 \leq 70.0$	15	Wet
$70.0 < S16 \leq 80.0$	16	Wet
$80.0 < S17 \leq 90.0$	17	Wet
$90.0 < S18 \leq 100.0$	18	Wet
$100.0 < S19 \leq 110.0$	19	Wet
$110.0 < S20 \leq 120.0$	20	Wet
$120.0 < S21 \leq 130.0$	21	Wet
$130.0 < S22 \leq 140.0$	22	Wet
$140.0 < S23 \leq 150.0$	23	Wet
$150.0 < S24 \leq 200.0$	24	Wet
$200.0 < S25 \leq 250.0$	25	Wet
$250.0 < S26 \leq 300.0$	26	Wet
$300.0 < S27 \leq 350.0$	27	Wet
$350.0 < S28 \leq 400.0$	28	Wet
$400.0 < S29 \leq 450.0$	29	Wet
$450.0 < S30$	30	Wet

Table 3. Example of Daily Precipitation Conversion into Daily Precipitation State for July at Seoul

Year	Days											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1908	3	1	1	1	1	1	1				7	16
1909	1	1	1	1	1	7	4				2	2
1910	2	11	1	1	2	27	2				1	1
1911	2	1	2	1	1	1	5				1	2
1912	1	1	1	1	1	3	1				2	1
.
.
.
.
.
.
1991	5	1	1	2	1	1	10				4	2
1992	1	3	5	2	1	1	1				1	3

3.2 상태별 천이확률행렬

일강수량 계열을 m개의 상태로 구분하고

Markov 연쇄이론을 적용하기 위하여 시간의 변화에 따라 달라지는 강수량의 상태가 천이해 가는 상태공간을 구축하였다. 여기서 구축된 상태공간은 강수량변화에 따른 확률값으로서 이를 근거로 상태의 연속적인 발생을 정의하는 천이확률이다. 천이확률의 계산을 위해서는 각 상태별로 천이해간 횟수를 계산함으로써 다음과 같은 천이횟수 행렬을 얻는다.

$$F = \begin{pmatrix} f_{1,1}, & f_{1,2}, & \cdots & f_{1,m} \\ f_{2,1}, & f_{2,2}, & \cdots & f_{2,m} \\ f_{3,1}, & f_{3,2}, & \cdots & f_{3,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{m,1}, & f_{m,2}, & \cdots & f_{m,m} \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 $f_{i,j}$ ($i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, m$)는 상태 i 의 강수에서 상태 j 의 강수로 천이해간 횟수를 나타낸다.

Markov 연쇄모형에서 m 개의 상태 S_1, S_2, \dots, S_m 의 상태변화에 따른 상태별 천이횟수로부터 계산된 천이확률은 다음과 같이 행렬로 표시될 수 있다.

$$P = \begin{pmatrix} P_{1,1}, & P_{1,2}, & \cdots & P_{1,m} \\ P_{2,1}, & P_{2,2}, & \cdots & P_{2,m} \\ P_{3,1}, & P_{3,2}, & \cdots & P_{3,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ P_{m,1}, & P_{m,2}, & \cdots & P_{m,m} \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서

$$P_{i,j} = \frac{f_{i,j}}{\sum_{k=1}^m f_{i,k}} \quad (i=1, \dots, m, j=1, \dots, m) \quad (3)$$

또한 행렬 P 를 1단계 천이확률행렬이라하며 행렬의 원소 $P_{i,j}$ 는 상태 S_i 에서 상태 S_j 로 천이되는 확률을 나타내며 상태 S_i 에서는 반드시 S_1, S_2, \dots, S_m 중 한 곳으로 천이되므로 다음식과 같이 각 행의 합이 1이 된다.

$$\sum_{j=1}^m P_{i,j} = 1 \quad (i=1, \dots, m, j=1, \dots, m) \quad (4)$$

위 식 (4)를 이용하여 천이확률 행렬의 누적확률 행렬을 계산하여 다음의 CP 행렬을 얻는다.

$$CP = \begin{pmatrix} CP_{1,1}, & CP_{1,2}, & \cdots & CP_{1,m} \\ CP_{2,1}, & CP_{2,2}, & \cdots & CP_{2,m} \\ CP_{3,1}, & CP_{3,2}, & \cdots & CP_{3,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ CP_{m,1}, & CP_{m,2}, & \cdots & CP_{m,m} \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서

$$CP_{i,j} = \sum_{k=1}^j P_{i,k} \quad (i=1, \dots, m, j=1, \dots, m) \quad (6)$$

이와같이 계산된 식 (5)의 누적확률 행렬을 이용하여 상태와 상태가 천이하게 되면서 상태가 결정되고 이에따른 강수량을 발생하게 된다.

3.3 강수량자료의 모의발생

상태 m 의 Markov 연쇄모형에 의한 강수발생 과정에는 강수의 상태별 천이확률 행렬과 최초 시작되는 강수의 상태를 지정하기 위한 초기확률이 필요하다. Markov 연쇄모형에서 초기확률은 정상상태의 확률에 의해 결정되므로 정상상태의 확률을 사용할 수 있으며, 일강수계열의 경우 일반적으로 습윤일의 확률보다는 건조일의 확률이 크게 나타나므로 강수의 초기확률은 건조일로 설정할 수 있다. 따라서 강수계열의 초기상태 이후 다음 시각의 강수량에 따른 상태를 연속적으로 추정하기 위해 균등분포 난수 $R_{nu}(0,1)$ 를 발생시키고 강수의 상태를 결정해 가는 과정을 표시하면 다음과 같다.

만약 시스템의 초기상태를 1이라고 하면, R_{nu} 과 비교하여 $R_{nu} \leq CP_{1,1}$ 이면 다음 시각의 강수 상태는 1로, $CP_{1,1} < R_{nu} \leq CP_{1,2}$ 이면 다음 시각의 강수 상태는 2로, $CP_{1,2} < R_{nu} \leq CP_{1,3}$ 이면 다음 시각의 강수의 상태는 3으로서 결정되며 이와같은 과정을 상태 30까지 모두 비교해 가면서 다음 시각에서의 강수량 상태를 결정하게 된다. 즉, 강수의 초기상태 i 가 지정되면 난수를 발생시

켜 $R_{nu} \leq CP_{ii}$ 이면 시스템의 상태는 1이 되고 $CP_{i,j-1} < R_{nu} \leq CP_{ij}$ ($j = 2, 3, 4 \dots m$) 이면 다음 시각에서의 강수량 상태는 j 라는 그 시각에서의 강수량 상태가 결정되어 이에 해당되는 강수량을 모의하게 된다. 따라서 시간단계를 증가시켜 가면서 주어진 기간동안 그 과정을 반복하여 소요기간 동안의 상태를 결정하여 상태에 따른 강수계열을 모의할 수 있다. 여기서 모의발생된 강수의 상태에 의하여 다시 강수량으로 변환시키기 위한 값은 상태별 강수량의 평균값을 취하였다.

모의발생된 자료로부터 상태-1의 강수만 제외시키면 실질적 강수의 상태(크기)별 발생빈도를

추정할 수 있으며 상태-2 이상의 강수를 합산함으로써 월평균 강수량을 추정할 수 있다. 또한 상태-1의 강수와 상태-2 이상의 강수를 분리함으로써 월별 건조일과 습윤일을 추정할 수 있으며 같은 방법으로 건조, 습윤계속일수의 추정이 가능하다.

4. 결과 및 분석

상태별 강수의 천이확률행렬인 상태공간이 구축되고 강수의 초기상태가 지정되면 균등분포난수를 발생시켜 지점별로 강수의 상태를 추정할 수 있다. 본 연구에서 강수계열의 모의발생은 상태-2

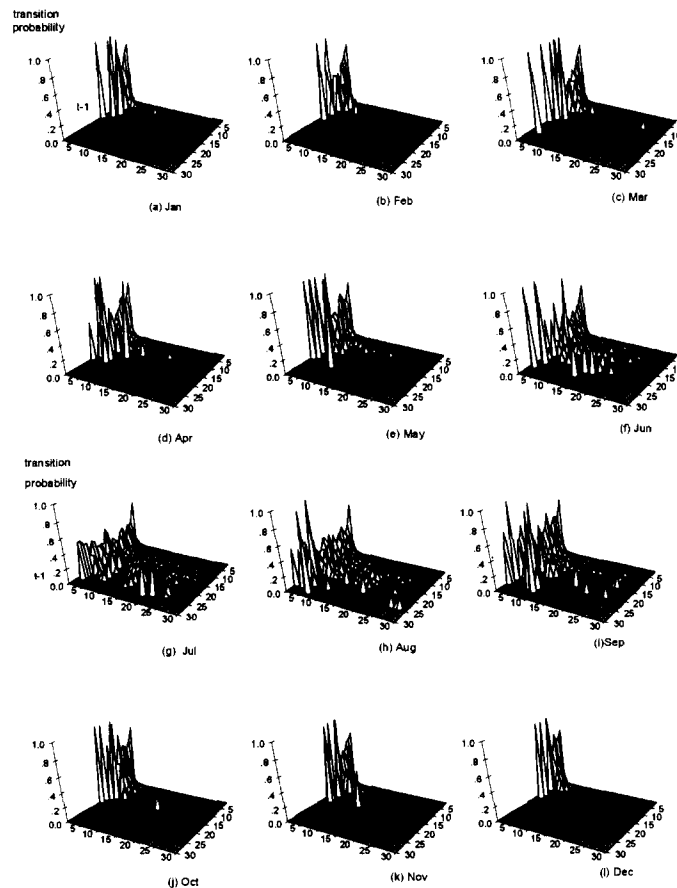


Fig. 3. Variation of Transition Matrix for Each Month at Seoul

Table 4. Comparisons of the Observed and Generated Run Length of Wet Days at Seoul.
(Obs. : Observed, M1 : 2-State Markov Chain Model, M2 : 30-State Markov Chain Model)

Month Runs	Jan			Feb			Mar			Apr			May			Jun			Jul			Aug			Sep			Oct			Nov			Dec				
	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2					
1	255	260	258	205	224	218	228	240	246	197	213	209	216	229	224	199	216	208	142	139	154	172	172	166	203	205	200	197	210	216	278	288	286	292	294	285		
2	77	86	83	77	72	70	117	94	89	119	94	91	125	100	96	145	116	108	124	113	99	122	119	116	105	99	95	102	84	89	122	112	109	98	101	102		
3	17	15	15	14	16	18	16	28	23	36	31	30	35	37	38	38	45	49	56	62	69	50	56	62	49	33	39	24	26	21	22	27	26	21	20	22		
4	4	2	4	3	3	4	11	7	8	10	14	15	12	15	15	23	19	19	47	50	49	31	32	36	20	16	19	6	10	11	11	12	15	9	5	6		
5	2	4	4	3	4	4	2	7	6	4	11	10	4	9	9	19	13	15	22	29	26	27	19	20	7	13	10	0	7	3	6	7	6	1	5	4		
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	2	1	3	2	4	6	15	12	11	10	10	5	2	3	2	0	0	1	1	1	1	0	0	0		
7	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	3	3	2	3	0	5	4	10	12	13	8	7	5	1	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	1	0	3	3	6	8	6	6	6	6	1	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	8	5	10	0	2	3	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	1	2	5	2	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	2	1	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rss.		119	54	391	236	858	1186	977	1038	843	951	1269	1632	273	952	122	434	363	189	563	575	227	266	46	85													

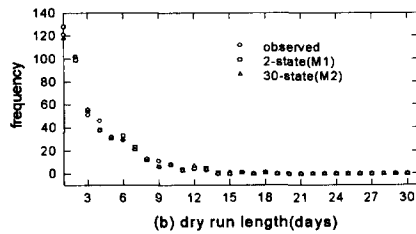
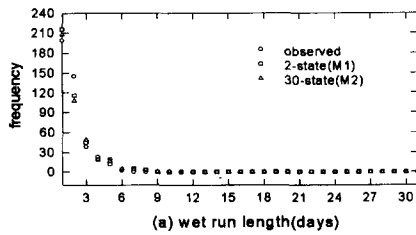


Fig. 4. Comparisons of Observed and Generated Frequency of Wet Run Length and Dry Run Length in June at Seoul.

Table 6은 대구관측소의 실측치와 두 모형에 의한 천이확률 α , β 의 값이다. 이것에 의하면 α 값은 습윤일이 가장 많은 7, 8, 9월에 큰 값을, β 값은 건조일이 많은 12월과 1월에 큰 값이 나타나고 있다. 여기서는 α 의 값이 클수록 강수의 발생확률이 크며 β 값이 클수록 건조일의 발생확률이 크다.

Table 7은 Markov 연쇄모형의 천이확률을 이용하여 모의발생시킨 목포 관측소의 평균 건조·습윤 지속기간 결과를 실측자료와 비교한 것이며 여기에서는 계절적 특성이 각 월별 지속일수에 영향을 미치는 것을 알 수 있으며 건조일인 경우 4월과 12월에 약간의 차이를 보일뿐 대체적으로 실측치에 근접하였으며 또 평균 습윤지속일수도 실측자료와 큰 차이를 보이지 않았다.

부산지점에 대한 일강수량의 건조일수와 습윤일수에 대한 모의발생치와 실측치를 비교한 것은 Fig. 5에서 볼 수 있으며, 여기서 M1 모형인 경우

Table 5. Comparisons of the Observed and Generated Run Length of Dry Days at Seoul.
(Obs. : Observed, M1 : 2-State Markov Chain Model, M2 : 30-State Markov Chain Model)

Month	Jan		Feb		Mar		Apr		May		Jun		Jul		Aug		Sep		Oct		Nov		Dec														
	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2													
1	70	96	92	60	70	63	70	97	94	78	92	89	98	105	101	121	128	119	190	164	174	155	141	133	102	99	96	72	79	78	98	136	135	122	127	122	
2	70	63	65	51	61	62	74	69	68	84	76	72	74	77	75	102	99	101	94	97	96	94	89	98	78	76	73	64	53	59	129	97	95	74	81	81	
3	51	60	62	47	59	59	61	65	64	57	58	59	63	70	68	51	55	56	45	77	77	51	70	68	66	55	57	44	64	63	76	75	74	55	67	73	
4	46	43	41	52	30	32	56	38	38	41	29	30	40	45	47	46	38	38	34	47	45	39	49	45	42	35	33	35	37	38	54	33	34	51	49	45	
5	35	25	26	26	26	25	31	23	25	38	30	28	45	23	22	32	31	32	34	27	26	29	21	21	33	32	29	26	24	22	34	32	32	33	23	23	
6	29	30	29	18	30	30	24	31	31	28	32	33	28	28	29	29	33	30	12	16	17	17	24	27	30	29	30	21	27	29	22	34	34	30	28	28	
7	21	18	17	17	14	13	22	21	22	19	27	28	28	25	27	21	23	21	12	9	8	22	16	15	20	26	27	27	16	15	13	27	26	22	28	28	
8	15	14	14	22	12	12	19	13	15	13	18	16	14	13	13	12	12	13	11	2	2	8	9	9	9	16	16	12	12	14	18	14	15	19	14	15	
9	19	12	13	14	10	12	16	11	11	13	5	6	10	9	9	11	6	6	8	3	3	6	7	7	14	9	8	14	12	11	6	5	5	9	9	9	
10	6	18	18	9	13	12	9	20	17	10	11	12	6	14	14	8	8	8	1	1	1	4	10	10	4	10	11	12	23	20	5	11	10	11	15	14	15
11	7	7	7	12	11	11	8	6	7	7	4	4	8	5	5	4	3	3	1	4	4	4	3	3	3	3	3	11	9	9	4	3	4	8	6	6	
12	2	2	1	7	2	2	7	3	3	4	5	4	8	4	4	4	5	7	1	1	1	1	5	5	4	3	5	11	2	3	3	4	4	5	4	4	
13	13	7	8	4	4	4	5	4	4	3	5	5	4	3	2	3	5	4	2	0	0	2	2	1	3	5	5	2	6	7	3	5	6	5	3	3	
14	5	3	3	1	5	5	7	5	5	4	5	4	2	5	4	0	1	0	0	1	1	3	3	3	2	7	6	6	3	3	3	2	1	5	4	4	
15	0	7	7	3	3	3	2	7	7	2	2	3	3	3	4	1	0	0	0	0	0	3	0	0	2	0	0	4	7	7	3	0	0	0	4	4	
16	4	3	3	1	4	4	2	4	4	1	3	3	0	3	3	1	1	1	0	0	0	2	0	0	0	3	3	4	3	3	2	1	1	1	3	3	
17	2	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	1	0	4	4	2	0	0	2	1	1	
18	4	1	1	5	3	2	1	0	0	2	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	2	1	1	0	0	0	
19	3	2	2	1	1	2	0	2	2	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	2	1	0	0	0	0	1	1	
20	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
21	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	0	0	0	1	1	
22	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
24	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
RSS.	12241028			11731014			14511193			666 684			737 726			192 133			20721630			9011109			391 473			1014 878			33303311			440 611			

Table 6. Comparisons of the Observed and Generated Transition Probability α and β at Taegu

Month	α (D - W)			β (W - D)		
	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2
Jan.	.11101	.11918	.11847	.63298	.69893	.68617
Feb.	.12823	.12118	.12342	.55825	.62162	.62903
Mar.	.18061	.17221	.17085	.63214	.63670	.63774
Apr.	.24312	.21484	.21341	.59249	.59048	.56656
May	.20106	.21245	.21697	.60938	.59756	.60790
Jun.	.24645	.28025	.28462	.53476	.48961	.48630
Jul.	.28731	.25917	.25483	.38674	.43070	.40166
Aug.	.25459	.27573	.27749	.45824	.45243	.44352
Sep.	.20736	.21971	.21957	.44417	.46543	.45526
Oct.	.12334	.12811	.12607	.62621	.63084	.65366
Nov.	.14286	.16925	.16958	.63393	.63855	.65306
Dec.	.11711	.13658	.13619	.74252	.67136	.68095

는 건조일과 습윤일의 연속과정만이 발생된 결과이고 M2 모형인 경우는 30개의 상태별 강수가 발생되므로 상태-1의 건조일을 제외한 나머지 29가지의 상태는 습윤일에 해당된다. 이것에 의하면 1년

Table 7. Comparisons of the Observed Average Wet and Dry at Mokpo

Month	Average Wet Continuous Period			Average Dry Continuous Period		
	Obs.	M1	M2	Obs.	M1	M2
Jan.	2.1	2.0	2.0	3.5	3.6	3.6
Feb.	2.1	1.9	1.9	3.8	3.9	3.9
Mar.	1.7	1.7	1.7	4.2	4.1	4.1
Apr.	1.8	1.8	1.8	3.7	4.1	4.1
May	1.8	1.7	1.7	4.0	4.3	4.3
Jun.	2.1	2.2	2.2	3.9	3.7	3.6
Jul.	2.4	2.5	2.5	3.5	3.4	3.5
Aug.	2.1	2.2	2.2	3.9	3.7	3.7
Sep.	1.9	1.9	1.9	4.1	4.2	4.2
Oct.	1.6	1.7	1.7	5.1	5.2	5.1
Nov.	1.8	1.9	1.9	3.9	3.6	3.6
Dec.	1.8	1.9	1.9	3.8	3.3	3.3

동안의 건조일 및 습윤일은 관측자료와 비슷한 변동을 보여주고 있으며 건조일과 습윤일의 변동 특성은 서로 상반된 변동경향을 가지며 대체적으로 관측계열의 특성을 잘 나타내 주었다.

Fig. 6은 M2 모형으로 부터 얻은 목포지점의

자료보유년수(86년), 100년 및 200년간에 대한 모의발생 결과중에서 월평균 강수량과 표준편차를 도시한 것이다. 여기에서는 월평균 강수량의 계절적 변동 특성이 잘 반영되고 있으며 표준편차의 경우에 월별로 관측치와 비슷한 경향을 가지나 계절적 변동이 우기인 6월, 7월 및 9월에 관측치 보다 오히려 편차가 작게 나타나고 있다. 부산지점에 대하여는 관측자료 보유년수(88년), 100년, 200년 및 300년간 강수자료를 모의발생시킨 결과 실측자료와의 월평균강수량과 표준편차를 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 6과 Fig. 7로부터 우기에 발생하는 최대강수량의 상태를 천이확률에 반영한다면 관측치에 더 근접한 결과를 얻을 수 있을 것이며 이를 위하여 강수의 크기 및 빈도를 파악하여 상태를 결정하는 것이 바람직할 것으로 생각되며 본 연구에서 제안된 모의 발생모형은 건기에 대한 적합성보다는 우기에 대한 적합성이 더 우수함을 알 수 있었다.

또한 본 연구에서 강수량을 여러 상태로 분류하여 모의발생시킨 결과 그 적합도를 알아보기 위하여 비교적 강수발생이 많은 8월과 9월의 서울지점에 대한 강수상태별 빈도를 Fig. 8와 Fig. 9와 같

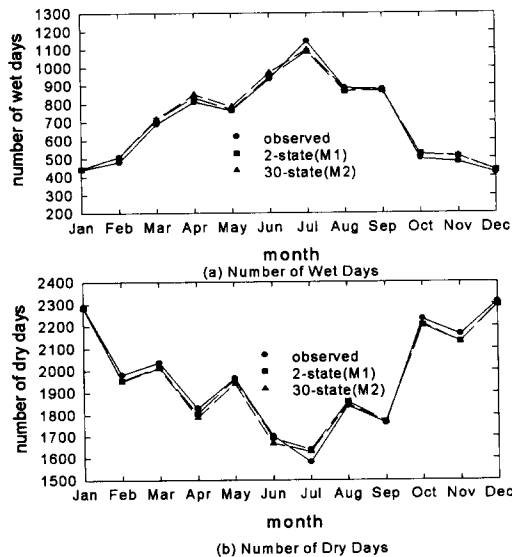


Fig. 5. Comparisons of Observed and Generated Number of Wet Day and Dry Day for Each Month at Pusan

이 알아보았다. 이는 M2 모형에 대한 적용결과로서 30개의 상태별 빈도를 실측치와 모의발생치로 구분하여 비교한 것으로 실측자료의 상태별 빈도와 잘 나타내고 있음을 알 수 있었다.

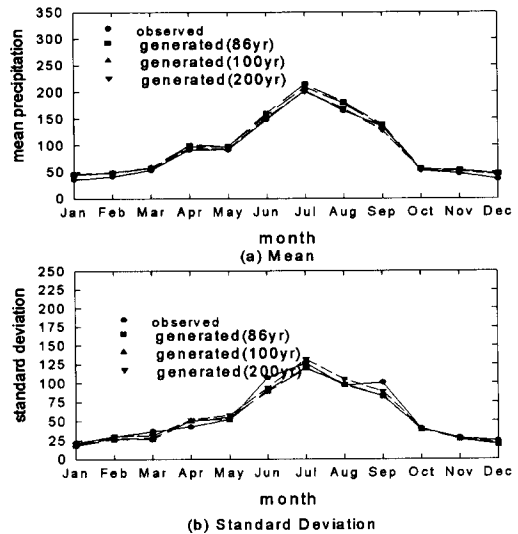


Fig. 6. Comparisons of Observed and Generated Monthly Mean and Standard Deviation at Mokpo

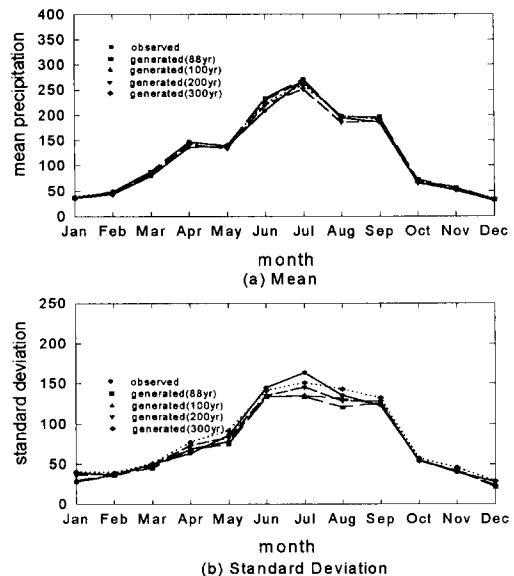


Fig. 7. Comparisons of Observed and Generated Monthly Mean(a) and Standard Deviation (b) at Pusan

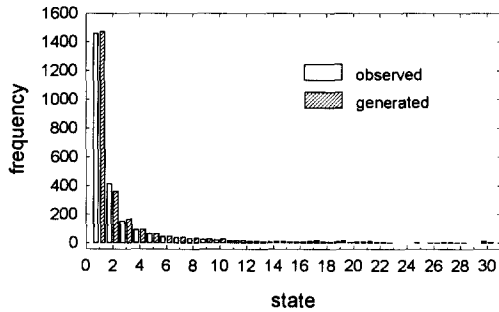


Fig. 8. Comparisons of Observed and Generated Frequency for Each State in August at Seoul

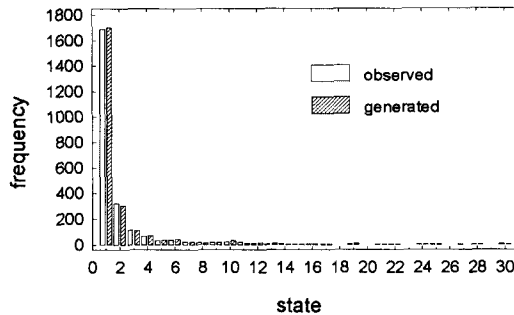


Fig. 9. Comparisons of Observed and Generated Frequency for Each State in September at Seoul

5. 결 론

본 연구는 Markov연쇄이론을 응용하여 일강수량 자료를 여러 개의 상태로 분류하여 강수계열의 모의발생에 적용한 것으로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서 제안된 모형은 건조·습윤일수 및 강수량을 Markov연쇄의 단일체계하에서 모의 발생시킬 수 있도록 하였기 때문에 일강수량 자료의 확률분석에 의한 모형에 비해 그 구조가 간단하여 쉽게 적용이 가능하다. 따라서 용수수급 및 수자원 이용을 위한 계획단계에서 개략적인 건조일 및 습윤일의 지속기간의 추정치를 손쉽게 얻을 수 있을

것으로 생각된다.

(2) 서울, 부산, 대구, 목포지점의 일강수량 자료를 대상으로 강수량의 크기별로 상태를 분류하여 설정함으로써 건조 및 습윤계열 뿐만 아니라 강우량의 크기를 동시에 모의발생시킬 수 있도록 하였다. 특히 일강수계열의 모의발생결과를 월단위로 환산하여 비교해 본 결과 월강수량 모의발생모형으로 사용하기에 용이할 것으로 판단되었다.

(3) 대상지점의 일강수계열 통계적 특성을 월별로 비교하여 관측치의 특성과 잘 일치되고 있음을 알 수 있었으며 건기에 대한 적합성보다는 우기에 대한 적합성이 약간 우수한 것으로 나타났는데 이는 습윤일의 강수량 상태를 여러 개로 분류하여 표현하였기 때문으로 생각된다.

(4) 상태별 천이확률의 계산을 위하여 관측된 자료계열의 특성을 고려하여 일강수량 자료의 발생빈도와 천이확률행렬의 규모등을 분석하여 우리나라에서 발생하는 강우의 확률적 의미를 갖도록 강수의 크기에 따라 30가지의 상태로 재구성하여 설정하였다. 그러나 우기에 발생하는 극치강수량의 천이확률에 대해서는 강수의 크기 및 빈도등을 고려하여 이를 상태를 결정하는 것이 바람직할 것으로 생각되며 습윤일의 강수량 상태를 설정할 수 있는 보다 구체적인 기준을 제시하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 인하재단발전기금의 일환으로 수행되었으며 이를 지원한 학교당국에 심심한 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

- 광관원 (1993). "중소유역의 강우계열 모의발생." 국제수문개발계획연구보고서, 건설부, pp. 2.1-2.96.
- 이재준 (1986). "강수계열의 모의발생모델 개발," 박사학위논문, 연세대학교.
- Adamowski, K., and Smith, A.F. (1972). "Stochastic generation of rainfall." *Jour. Hydr. Div., ASCE*, Vol. 98, No. HY11, pp. 1935-1945.

- Caskey, J.E. (1963). "A Markov chain model for the probability of precipitation occurrence in intervals of various length." *Monthly Weather Review*, Vol. 91, No. 6, pp. 298-301.
- Haan, C.T., Allen, D.M., and Street, J.O. (1976). "A Markov chain model of daily rainfall." *Water Resour. Res.*, Vol. 12, No. 3, pp. 443-449.
- Hopkins, J.W., and Robillard, P. (1964). "Some statistics of daily rainfall occurrence for the Canadian Prairie Provinces." *Jour. Appl. Meteor.*, Vol. 3, pp. 600-602.
- Khanal, N.N., and Hamrick, R.L. (1974). "A stochastic model for daily rainfall data synthesis." *Proceedings Symposium on Statistical Hydrology*, Agricultural Research Service United States Department of Agriculture, pp. 154-196.
- Nord J. (1975). "Some applications of Markov chains." *Fourth Conf. on Prob. and Statist. in Atmosp. Sci.*, Nov. 18-21, Tallahassee, pp. 125-130.
- Srinivasan, V.S., and Gomes, H.P. (1988). "Generation of synthetic sequence of multiple stations using the analysis of variance model." *Computer Methods and Water Resources Computational Hydrology*, pp. 37-49.
- Weiss, L.L. (1964). "Sequences of wet or dry days described by a Markov chain probability model." *Monthly Weather Review*, Vol. 92, No. 4, pp. 169-176.
- Kang, Y.Q. (1987). "Markov chain model for daily amount of cloud in Korea." *Korean Meteorological Science Association*, Vol. 23, No. 3, pp. 1-11.

〈접수: 1996년 7월 15일〉