

우리나라 일별 강수발생의 확률과 주기성의 특성

문승의 · 김백조 · 하창환*
부산대 대기과학과, *부산지방 기상청
(1996년 11월 11일 접수)

On the Characteristics of Probability and Periodicity for the Daily Precipitation Occurrence in Korea

Sung-Euli Moon, Baek-Jo Kim, and Chang-Hwan Ha*
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea
**Pusan Regional Meteorological Office*
(Manuscript received 11 November 1996)

The characteristics on the transition probabilities and periodicity for the daily precipitation occurrence in Korean peninsula are investigated by applying the Markov chain properties to daily precipitation occurrence.

In order to examine the responses of Markov Chain properties to the applied period and their magnitudes, three cases (Case A: 1956~1985 at 14 stations, Case B: 1965~1994 at 14 stations, and Case C: 1985~1994 at 63 stations) are considered in this study.

The transition probabilities from wet day to wet day for all cases are about 0.50 and in summer, especially July, are higher. In addition, considering them in each station we can find that they are the highest at Ullung-do and lowest at Incheon for all cases. The annual equilibrium probabilities of a wet day appear 0.31 in Case A, 0.30 Case B, and 0.29 Case C, respectively. This may explain that as the data-period used becomes shorter, the higher the equilibrium probability is. The seasonal distributions of equilibrium probabilities are appeared the lowest(0.23~0.28) in winter and the highest(more than 0.39) in spring and monthly in July and in October, respectively. The annual mean wet duration for all cases is 2.04 days in Case A, 1.99 Case B, and 1.89 Case C, respectively. The weather cycle obtained from the annual mean wet and dry duration is 6.54~6.59 days, which are closely associated with the movement of synoptic systems.

And the statistical tests show that the transitions of daily precipitation occurrence for all cases may have two-state first Markov chain property, being the stationarity in time and heterogeneity in space.

Key words : Markov chain property, transition probability, periodicity, daily precipitation occurrence

1. 서론

미래의 날씨를 예측하기 위해서는 현재 또는 과거의 일기에 대한 정보와 이해가 있어야 한다. 그 예측방법은 여러가지가 제시되고 있지만 일기예보의 불확실성을 정량적으로 표현하는 방법으로 확률이 종종 사용된다. 이같은 확률을 적용한 기상학적 연구는 많이 행해져 왔으며 그 중에서도 특히 강수의 확률예보는 주된 관심사가 되었다(Glahn 과 Lowry, 1972 ; 권과 이, 1988).

먼저 Gabriel과 Neumann(1962)은 27년간(1923/24~1949/50)의 우기동안 강수 빈도수를 사용하여 매일의 강수현상이 바로 전일의 강수현상에 의존하는 성질, 즉 일별 강수발생이 양상(two-state) 1차 마르코프 연쇄특성(first-order Markov chain properties)을 가짐을 보였다. 그리고 일별 강수량 뿐만 아니라 일별 습도, 일별 운량 등과 같은 기상요소들의 시계열도 마르코프 연쇄성질을 가짐이 밝혀졌다(Kang, 1987).

한편 그들의 연구 이후에 기상관측 자료를 이러한 연쇄성질에 적합(fitting)시켜 보려고 하는 다소 복잡한 모델들이 제안되었다. 예를 들면 1차 마르코프 연쇄보다 높은 차수가 일별 강수발생의 적합에 사용되었다. 일별 강수발생과 강수량에 대한 마르코프 연쇄모델은 Todorovic과 Woolhiser (1975), Katz(1977)에 의해 일반화 되었다. Kang과 Gong(1987)은 우리나라의 해안지점에서 해수온도의 월별 아노말리가 마르코프 연쇄성질을 가짐을 보였다. 이러한 결과는 해수온도의 기억(memory)이 수개월의 크기로 확대되는 것을 암시한다. 이처럼 지구물리학에서 연속적인 사건은 마르코프 연쇄성질을 가지며 이들 성질들은 현재 상태에 근거하여 미래를 예측하는 데 크게 기여한다. 이러한 마르코프 연쇄모델은 기상학적 문제들에 성공적으로 적용되고 있다(Gates and Tong, 1976; Chin, 1977; Katz, 1985).

본 연구는 우리나라 14개 관측지점의 30년간(1965~1994) 그리고 63개 관측지점에 대한 10년간(1985~1994)의 일강수량을 토대로 마르코프 연쇄성질을 이용하여 우리나라의 계절별, 지점별 강수발생의 추이확률과 주기성을 조사하고 그 결과를 Moon *et al.*(1994)의 그것과 상호비교하여 우리나라 강수발생의 특성

과 함께 적용기간을 달리함에 따른 마르코프 연쇄성질의 반응의 차이점의 존재와 그 정도를 알아보고자 한다. 산성비의 산도, 침적 등의 관측과 모델링에서 가장 중요한 기초조사는 강수의 강도, 유형, 발생확률 및 주기성과 아울러 그 발생원인 규명에 있다. 따라서 이같은 연구는 최근 동아시아, 유럽 그리고 북미 대륙에서 중대한 환경문제로 대두된 산성비의 효율적인 관측과 모델 개발에도 매우 중요한 기초자료가 되리라고 보기 때문이다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 자료

본 연구에 사용된 자료는 우리나라 기상청에서 발행된 기상월보에서 발췌한 14개 지점에 대한 1965년부터 1994년까지 30년간의 일강수량과 1985년에서 1994년까지 10년간의 63개 지점의 시간별 강수량에서 환산된 일강수량들이다. 그리고 Moon *et al.*(1994)의 연구에서 사용된 자료기간은 1956년부터 1985년까지로 30년간이며 관측지점은 전자의 경우와 동일하였다. 연구결과들의 상호비교를 용이하게 하기 위해서 Moon *et al.*(1994)의 결과를 함께 제시하였으며 그것을 A경우, 본 연구의 결과를 각각 B경우와 C경우로 정하였다. 일강수량이 0.1mm이상일 때를 강수일(wet day), 그 미만을 무강수일(dry day)로 구분하여 각각 'W'와 'D'로 표현하였다.

2.2 마르코프 연쇄과정

일반적으로 마르코프 연쇄과정은 시각 t 의 현재값이 $t-1$ 의 바로 직전의 값에 의존하는 상태들의 추이배열(sequence of transition)을 일컫는다. 즉 과거상태의 과정 $\mathcal{J}_1, \dots, \mathcal{J}_{n-1}$ 과 현재상태의 과정, \mathcal{J}_n 이 주어진다. 미래상태 \mathcal{J}_{n+1} 의 조건부 분포는 과거상태들에 의존한다는 것이다. 이러한 의존성은 모든 과정에서 동일하다.

마르코프 과정을 특별한 시각에서 주어진 상태(s_t)가 바로 이전의 상태(s_{t-1})의 정보들로부터 추론될 수 있는 확률과정(probability process)으로 가정하자. 이런 확률은 소위 말하는 추이확률(transition probabilities)이며, 다음과 같은 행렬배열로 표현된다(Harbaugh and Bonham Cater, 1981);

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} s_1 & s_2 & \dots & s_r \end{matrix} \\ \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_r \end{matrix} & \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1r} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{r1} & p_{r2} & \dots & p_{rr} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

여기서 p 는 s_1, s_2, \dots, s_r 로 표시된 행 (column)을 가지는 하나의 상태에서 행렬위에 s_1, s_2, \dots, s_r 으로 나타낸, 다음 상태로의 추이확률을 의미한다. 그러므로 상태 s_1 과 s_2 에서 상태 s_1, s_2, \dots, s_r 로의 추이확률은 각각 위쪽 열과 두번째 열에 할당된 p 값으로 주어진다.

본 연구에서는 두개의 연속적인 상태간의 추이빈도수인 계산행렬(tally matrix) n_{ij} ,과 일별 강수발생의 추이확률 행렬인 p_{ij} 를 다음과 같이 표현된다;

$$N = \begin{matrix} W & \begin{bmatrix} W & D \\ n_{11} & n_{12} \end{bmatrix} \\ D & \begin{bmatrix} n_{21} & n_{22} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$P = \begin{matrix} W & \begin{bmatrix} W & D \\ p_{11} & p_{12} \end{bmatrix} \\ D & \begin{bmatrix} p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

여기서 n_{ij} 와 p_{ij} 는 각각 상태 i 에서 다음 상태 j 로의 추이와 확률의 값을 표현한다. 예를 들면, 계산행렬 n_{11} 과 n_{12} 및 추이확률 p_{11} 과 p_{12} 는 각각 강수일에서 강수일 및 강수일에서 무강수일로의 추이빈도수와 추이확률을 나타낸다.

2.3 통계검증

일별 강수발생에 대한 마르코프 연쇄성질은 연속적인 사건이 서로 독립적인가(귀무가설) 또는 종속적인가(대립가설)를 조사함으로써 통계적으로 검증될 수 있다. 만약 종속적이라면 연속적인 사건들은 1차 마르코프 연쇄를 만들 수 있다. Anderson과 Goodman(1957)에 따르면 만약 연속적인 사건들이 독립적이라면

$$a = 2 \sum_{i,j}^m n_{ij} \ln(p_{ij}/p_i) \quad (3)$$

으로 정의된 통계량 a 는 자유도 $(m-1)^2$ 를 가진 χ^2 분포에 점근적으로 분포한다. 여기서 m 은 상태들의 총 수(본 연구의 경우 $m=2$)를 의미하고 n_{ij} 와 p_{ij} 는 각각 상태 i 에서 다음상태 j

로의 추이빈도수와 추이확률을 나타내며, p_j 는 추이확률 행렬의 j 행에 대한 주변확률 (marginal probabilities), 즉 다음 식으로 표현된다:

$$p_j = \sum_i^m n_{ij} / \sum_{i,j}^m n_{ij} \quad (4)$$

2.3.1 정상성(stationarity)과 균질성(homogeneity)

마르코프 과정의 추이확률이 시간에 독립적 이면 마르코프 과정은 정상적이다. 정상성을 검증하는 일반적인 방법은 사건들의 전체 배열을 몇개의 구간격으로 나누고 각각의 구간격에 대한 추이확률 행렬을 계산하여 그것을 비교하는 것이다. 정상과정의 경우 이들 행렬들이 모두 거의 동일하다. Anderson과 Goodman (1957)에 의해 제안된 검증통계량 β 는

$$\beta = 2 \sum_t^T \sum_{i,j}^m n_{ij}(t) \ln [p_{ij}(t)/p_{ij}] \quad (5)$$

여기서는 T 는 구간격의 수(본 연구에서는 $T=3$)이고, $n_{ij}(t)$ 와 $p_{ij}(t)$ 는 각각 t 번째 구간격의 계산행렬의 (i,j) 요소들과 추이확률 행렬을 의미한다. 만약 마르코프 연쇄과정이 정상적이면 식 (5)의 통계량 β 는 자유도 $(T-1)m(m-1)$ 을 가진 χ^2 분포를 가진다.

유사하게, 마르코프 연쇄성질의 공간 균질성은 다음으로 검증될 수 있다. 만약 여러 지점에서 연속적인 사건들의 마르코프 연쇄성질이 균질하다면

$$r = 2 \sum_s^S \sum_{i,j}^m n_{ij}(s) \ln [p_{ij}(s)/p_{ij}] \quad (6)$$

으로 정의된 통계량 r 는 자유도 $(S-1)m(m-1)$ 을 가진 χ^2 분포를 가진다. 여기서 S 는 구간격의 수(본 연구에서는 $S=14$)이다. 식(6)에서 $n_{ij}(s)$ 와 $p_{ij}(s)$ 는 각각 s 지점에서 사건들의 계산행렬의 (i,j) 요소들과 추이확률의 행렬을 나타낸다.

2.3.2. 일별 강수발생의 적용

일반적으로 단계에서 상태 i 에서 상태 j 로의 과정인 단계 추이확률은

$$P_{ij}^{(n)} = \text{prob}(\text{state } j \text{ at time } n \mid \text{state } i \text{ at time } 0) \\ n = 0, 1, 2, \dots$$

으로 표시된다. n 단계 추이확률이 행렬 P^n 다시말해 n 번이 곱해진 추이확률 행렬 P 의 요

Table 1. Transition probabilities of the occurrence of wet and dry days following the same conditions previous day for each case

[A]		(To)	[B]		[C]	
		W D			W D	
(From)	W	0.51 0.49	W	0.50 0.50	W	0.49 0.51
	D	0.22 0.78		D		0.22 0.78

Table 2. Seasonal transition probabilities for each case

Season\Case	A	B	C
Spring	$\begin{bmatrix} 0.45 & 0.55 \\ 0.23 & 0.77 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.43 & 0.57 \\ 0.22 & 0.78 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.43 & 0.57 \\ 0.21 & 0.79 \end{bmatrix}$
Summer	$\begin{bmatrix} 0.58 & 0.42 \\ 0.27 & 0.73 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.59 & 0.41 \\ 0.27 & 0.73 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.59 & 0.41 \\ 0.26 & 0.74 \end{bmatrix}$
Autumn	$\begin{bmatrix} 0.47 & 0.53 \\ 0.20 & 0.80 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.47 & 0.53 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.45 & 0.55 \\ 0.18 & 0.82 \end{bmatrix}$
Winter	$\begin{bmatrix} 0.49 & 0.51 \\ 0.18 & 0.82 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.49 & 0.51 \\ 0.20 & 0.80 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.44 & 0.56 \\ 0.20 & 0.80 \end{bmatrix}$

소임이 쉽게 증명된다. 만약 n 단계후에 $\pi = \pi p$ 이면 그때의 분포는 정상성을 가지며 이런 $\pi = (\pi_0, \pi_1)$ 을 균형확률(equilibrium probabilities)이라고 부른다. 균형확률은 상태직 무확률(state occupation probabilities)이 초기조건에 독립적임을 의미한다. 일별 강수발생에 양상(two-states) 1차 마르코프 연쇄성질의 적용을 고려할때 균형확률은 강수일이나 무강수일의 출현 확률이 이전의 조건과 무관함을 의미한다. 여기서 π_0 (강수일 요소)와 π_1 (무강수일 요소)은 다음과 같이 간단하게 표현된다 (Cox and Miller, 1965).

$$\pi_0 = \frac{p_{21}}{p_{21} + p_{12}}, \pi_1 = \frac{p_{12}}{p_{21} + p_{12}} \quad (7)$$

Cox와 Miller(1965)에 따르면, 길이 n을 가진 강수일과 무강수일 기간의 확률은

$$\text{Prob}(W=n) = (1-p_{11})^{n-1} p_{11} \quad (8)$$

$$\text{Prob}(D=n) = (1-p_{22})^{n-1} p_{22} \quad (9)$$

이며, 이것들의 평균기간은

$$E(W) = \frac{1}{(1-p_{11})} \quad (10)$$

$$E(D) = \frac{1}{(1-p_{22})} \quad (11)$$

으로 나타내어 진다. 그때 날씨순환(weather cycle)은

$$E(C) = E(W) + E(D) \quad (12)$$

이다.

3. 결과 및 고찰

마르코프 연쇄성질을 세가지의 경우 즉 연구기간을 1956년부터 1985년까지의 30년간(A경우), 1965년부터 1994년까지의 30년간의 14개지점(B경우) 그리고 최근 10년간(1985~1994)의 65개 지점(C경우)의 일별 강수량에 적용하여 우리나라의 지점별, 계절별 강수발생의 추이확률과 주기성을 조사 및 상호비교를 통하여 우리나라의 강수발생의 특성과 마르코프 연쇄성질의 반응을 알아보고자 한다.

3.1 추이확률

강수일에서 강수일로의 추이확률은 A와 B경우에 강수일에서 무강수일로의 그것보다 크거

우리나라 일별 강수발생의 확률과 주기성의 특성

Table 3. Monthly transition probabilities for each case

Month\Case	A	B	C
Jan.	$\begin{bmatrix} 0.51 & 0.49 \\ 0.18 & 0.82 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.50 & 0.50 \\ 0.18 & 0.82 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.43 & 0.57 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$
Feb.	$\begin{bmatrix} 0.51 & 0.49 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.52 & 0.48 \\ 0.21 & 0.79 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.48 & 0.52 \\ 0.21 & 0.79 \end{bmatrix}$
Mar.	$\begin{bmatrix} 0.42 & 0.58 \\ 0.20 & 0.80 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.42 & 0.58 \\ 0.22 & 0.78 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.43 & 0.57 \\ 0.22 & 0.78 \end{bmatrix}$
Apr.	$\begin{bmatrix} 0.48 & 0.52 \\ 0.35 & 0.65 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.44 & 0.56 \\ 0.24 & 0.76 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.42 & 0.58 \\ 0.20 & 0.80 \end{bmatrix}$
May.	$\begin{bmatrix} 0.43 & 0.57 \\ 0.22 & 0.78 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.44 & 0.56 \\ 0.21 & 0.79 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.44 & 0.56 \\ 0.22 & 0.78 \end{bmatrix}$
Jun.	$\begin{bmatrix} 0.52 & 0.48 \\ 0.26 & 0.74 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.51 & 0.49 \\ 0.25 & 0.75 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.50 & 0.50 \\ 0.23 & 0.77 \end{bmatrix}$
Jul.	$\begin{bmatrix} 0.65 & 0.35 \\ 0.43 & 0.57 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.64 & 0.36 \\ 0.29 & 0.71 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.65 & 0.35 \\ 0.29 & 0.71 \end{bmatrix}$
Aug.	$\begin{bmatrix} 0.57 & 0.43 \\ 0.25 & 0.75 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.59 & 0.41 \\ 0.27 & 0.73 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.59 & 0.41 \\ 0.27 & 0.73 \end{bmatrix}$
Sep.	$\begin{bmatrix} 0.53 & 0.47 \\ 0.23 & 0.77 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.51 & 0.49 \\ 0.22 & 0.78 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.50 & 0.50 \\ 0.20 & 0.80 \end{bmatrix}$
Oct.	$\begin{bmatrix} 0.41 & 0.59 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.42 & 0.58 \\ 0.16 & 0.84 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.42 & 0.58 \\ 0.14 & 0.86 \end{bmatrix}$
Nov.	$\begin{bmatrix} 0.46 & 0.54 \\ 0.21 & 0.79 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.45 & 0.55 \\ 0.22 & 0.78 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.42 & 0.58 \\ 0.20 & 0.80 \end{bmatrix}$
Dec.	$\begin{bmatrix} 0.43 & 0.57 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.43 & 0.57 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.39 & 0.61 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$

나 같았고, C경우는 강수일에서 무강수일로의 추이확률이 작았다. 무강수일에서 강수일로의 추이확률은 모든 경우에서 무강수일에서 무강수일로의 그것보다 약 3.5배정도 작았지만,

C의 경우는 그 차이가 A와 B의 경우보다 더 컸다(Table 1).

Table 2는 각 경우에 대한 계절별 추이확률을 나타낸 것이다. 먼저 여름의 강수일에서 강

Table 4. Transition probabilities for each case at each of the 14 stations

Station\Case	A	B	C
Kangnung	$\begin{bmatrix} 0.52 & 0.48 \\ 0.20 & 0.80 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.52 & 0.48 \\ 0.20 & 0.80 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.54 & 0.46 \\ 0.20 & 0.80 \end{bmatrix}$
Seoul	$\begin{bmatrix} 0.47 & 0.53 \\ 0.23 & 0.77 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.47 & 0.53 \\ 0.22 & 0.78 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.47 & 0.53 \\ 0.22 & 0.78 \end{bmatrix}$
Inchon	$\begin{bmatrix} 0.44 & 0.56 \\ 0.21 & 0.79 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.44 & 0.56 \\ 0.21 & 0.79 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.45 & 0.55 \\ 0.22 & 0.78 \end{bmatrix}$
Ullung-do	$\begin{bmatrix} 0.58 & 0.42 \\ 0.28 & 0.72 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.56 & 0.44 \\ 0.28 & 0.72 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.54 & 0.46 \\ 0.28 & 0.72 \end{bmatrix}$
Chupungnyong	$\begin{bmatrix} 0.49 & 0.51 \\ 0.24 & 0.76 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.49 & 0.51 \\ 0.23 & 0.77 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.50 & 0.50 \\ 0.22 & 0.78 \end{bmatrix}$
Pohang	$\begin{bmatrix} 0.48 & 0.52 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.48 & 0.52 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.49 & 0.51 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$
Taegu	$\begin{bmatrix} 0.46 & 0.54 \\ 0.18 & 0.82 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.45 & 0.55 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.46 & 0.54 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$
Chunju	$\begin{bmatrix} 0.49 & 0.51 \\ 0.24 & 0.76 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.49 & 0.51 \\ 0.25 & 0.75 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.50 & 0.50 \\ 0.25 & 0.75 \end{bmatrix}$
Ulsan	$\begin{bmatrix} 0.49 & 0.51 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.48 & 0.52 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.49 & 0.51 \\ 0.18 & 0.82 \end{bmatrix}$
Kwangju	$\begin{bmatrix} 0.52 & 0.48 \\ 0.24 & 0.76 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.52 & 0.48 \\ 0.25 & 0.75 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.52 & 0.48 \\ 0.25 & 0.75 \end{bmatrix}$
Pusan	$\begin{bmatrix} 0.49 & 0.51 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.48 & 0.52 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.48 & 0.52 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$
Mokpo	$\begin{bmatrix} 0.51 & 0.49 \\ 0.23 & 0.77 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.51 & 0.49 \\ 0.23 & 0.77 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.53 & 0.47 \\ 0.23 & 0.77 \end{bmatrix}$
Yosu	$\begin{bmatrix} 0.52 & 0.48 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.50 & 0.50 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.50 & 0.50 \\ 0.19 & 0.81 \end{bmatrix}$
Cheju	$\begin{bmatrix} 0.55 & 0.45 \\ 0.26 & 0.74 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.55 & 0.45 \\ 0.26 & 0.74 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.53 & 0.47 \\ 0.24 & 0.76 \end{bmatrix}$

Table 5. The values of α and β at each of the 14 stations for A case

Station	α	β
Kangnung	1116.08	10.88
Seoul	633.16	11.40
Inchon	542.00	6.39
Ullung-do	936.17	17.04
Chupungnyong	693.96	6.39
Pohang	881.21	7.73
Taegu	711.54	7.54
Chonju	695.91	8.24
Ulsan	911.25	2.83
Kwangju	848.16	9.43
Pusan	914.62	8.85
Mokpo	813.76	11.27
Yosu	1095.34	9.13
Cheju	931.26	3.06

Table 6. Transition probabilities of daily precipitation at Ullung-do in 3 subintervals for A and B cases

Subinterval \ Case	A	B
First	0.59 0.41	0.56 0.44
	0.31 0.69	0.28 0.72
Second	0.56 0.44	0.56 0.44
	0.28 0.72	0.28 0.72
Third	0.57 0.43	0.54 0.46
	0.26 0.74	0.28 0.72

수일로의 추이확률은 모든 경우에서 0.58~0.59로 다른 계절보다 0.10정도 높게 나타났으며, 가을과 겨울의 무강수일에서 무강수일로의 추이확률은 0.80이상으로 봄과 여름보다 높았다. 특히 C 경우 가을과 겨울의 강수일에서 무강수일로의 추이확률이 각각 0.55와 0.56으로 다른 경우들보다 아주 높게 나타났다. 그리고 봄, 가을, 겨울의 강수일에서 무강수일, 무강수일에서 강수일로의 추이확률간의 차이는 0.

31~0.37의 범위에 존재하였고 여름의 경우 0.14~0.15으로 나타났다. 이것으로 우리나라의 일별 강수발생이 여름철에 아주 빈번하며 봄철은 비가 내린후 다음날 날씨가 개일 확률이 가장 높음을 알 수 있다.

월별 강수일에서 강수일로의 최대 추이확률은 모든 경우에 7월에 나타났고 그 다음은 8월이었으며, 최소 추이확률은 A 경우와 B 경우는 각각 0.41과 0.42인 10월에 그리고 C 경우는 0.39인 12월에 나타났다. 무강수일에서 강수일로의 추이확률은 모든 경우에서 7월에 가장 높게 나타났다. 반면에 무강수일에서 무강수일로의 최대 추이확률은 A 경우 1월에 0.82, B 경우와 C 경우는 10월에 각각 0.84와 0.86이었으며 최근의 10년간의 경우에 높게 나타나는 경향이 보인다(Table 3). 이같은 특징은 강수빈도가 장마전선과 태풍 등의 영향으로 7월과 8월에 높고 이동성 고기압의 영향받는 10월에 낮기 때문으로 해석된다.

동일지점에 대한 경우별 추이확률을 비교하기 위해서 C 경우의 14개지점을 선택하여 각 지점별 추이확률을 Table 4에 나타내었다. 일반적으로 동해안의 강릉, 남서해안지역에 위치한 광주, 목포 및 여수와 섬지역인 울릉도와 제주를 제외한 대부분 지점들에서 강수일에서 강수일로의 추이확률이 강수일에서 무강수일로의 그것보다 낮게 나타난다. 이는 우리나라의 남서해안 및 제주지역은 겨울철 해양상에서 변질된 cP기단의 영향으로 동계에 다른 지역보다 높은 강수발생 빈도와 강릉과 울릉도는 강수현상에 미치는 지형효과가 크게 작용하기 때문으로 생각된다. 14개의 관측지점들 중에서 강수일에서 강수일로의 추이확률의 최대값은 모든 경우에 대해 울릉도에서 나타났으며 그 값의 범위는 0.54~0.56이었다. 강수일에서 강수일로의 추이확률은 모든 경우 0.44~0.45인 인천에서 가장 낮게 나타났다. A 경우의 무강수일에서 무강수일로의 추이확률이 가장 높게 나타난 지점이 대구인 반면에 C 경우는 울산으로 나타났다. 최근 10년간 영남 동해안지역의 낮은 일별 강수발생을 반영한 것으로 생각된다. B 경우는 여수와 동해남부지역 즉 포항, 울산, 부산 및 대구에서 높게 나타났다.

3.2 통계검증

Table 7. The annual and seasonal equilibrium probabilities for each case

State	Case	Annual	Spring	Summer	Autumn	Winter
W	A	0.31	0.29	0.39	0.28	0.27
	B	0.30	0.28	0.39	0.26	0.28
	C	0.29	0.24	0.43	0.23	0.26
D	A	0.69	0.71	0.61	0.72	0.73
	B	0.70	0.72	0.61	0.74	0.72
	C	0.71	0.76	0.57	0.77	0.74

Table 8. The annual equilibrium probabilities for each case at each of the 14 stations

Station	State						Station	State					
	W			D				W			D		
	A	B	C	A	B	C		A	B	C	A	B	C
Kangnung	0.29	0.29	0.30	0.71	0.71	0.70	Chonju	0.32	0.33	0.33	0.68	0.67	0.67
Seoul	0.30	0.29	0.29	0.70	0.71	0.71	Ulsan	0.28	0.27	0.26	0.72	0.73	0.74
Inchon	0.27	0.27	0.29	0.73	0.73	0.71	Kwangju	0.34	0.34	0.34	0.66	0.66	0.66
Ullung-do	0.40	0.39	0.38	0.60	0.61	0.62	Pusan	0.28	0.27	0.27	0.72	0.73	0.73
Chupung-nyong	0.32	0.31	0.31	0.68	0.69	0.69	Mokpo	0.32	0.32	0.33	0.68	0.68	0.67
Pohang	0.28	0.27	0.27	0.72	0.73	0.73	Yosu	0.28	0.28	0.28	0.72	0.72	0.72
Taegu	0.25	0.26	0.26	0.75	0.74	0.74	Cheju	0.37	0.37	0.34	0.63	0.63	0.66

Table 9. Monthly equilibrium probabilities for each case

State	Case	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
W	A	.27	.28	.25	.40	.28	.36	.55	.37	.33	.24	.28	.25
	B	.27	.30	.27	.30	.28	.34	.44	.40	.31	.22	.36	.25
	C	.25	.29	.28	.26	.28	.32	.45	.40	.29	.19	.26	.24
D	A	.73	.72	.75	.60	.72	.64	.45	.63	.67	.76	.72	.75
	B	.73	.70	.73	.70	.72	.66	.56	.60	.69	.78	.71	.75
	C	.75	.71	.72	.74	.72	.68	.55	.60	.71	.81	.74	.76

본 연구에서 일별 강수발생의 연속적인 상태들이 독립적인지 아니면 종속적인지를 식(3)에 주어진 통계량 α 값을 계산하여 조사하였고 또 일별 강수발생에 대한 마르코프 연쇄성질이 정상적인지 또는 그렇지 않은지를 식(5)에 주어진 통계량 β 를 조사하여 검증하였다. 예로서 A 경우에 대한 결과들을 Table 5에 제시하였다. 모든 경우에서 14개지점에 대한 α 값이 자유도가 1이고 유의수준 5%인 경우의 χ^2 값(3.84)보다 크므로, 연속적인 추이가 독립과정이라는 귀무가설을 기각하고 일별 강수발생이 1차 마르코프 연쇄성질을 갖는다는 대립가설을 수용할 수 있다(Selby, 1971). 특히 통계량 β 값은 A 경우 울릉도와 목포에서, B 경우 울릉도와 제주에서 그리고 C 경우 대관령, 울릉도에서 다소 높게 나타났다.

일별 강수발생의 마르코프 연쇄성질이 정상적인지 그렇지 않은지를 검증하기 위해서 각 지점의 30년간의 일별 강수자료를 각각 10년, 자료기간이 10년인 경우 1년의 준간격으로 나누어 각 준간격에 대한 추이확률을 계산하였다. 모든 준간격에서 추이확률은 동일하게 나타나므로 일별 강수발생의 마르코프 연쇄성질이 우리나라의 모든 지점에서 정상적임을 의미한다. 예로서 울릉도에서 일별 강수발생의 결과를 Table 6에 보였다.

우리나라의 14개지점의 마르코프 연쇄성질의 공간 균질성에 대한 식(6)의 검증 통계량 γ 값은 A경우에서 1499.74, B경우에서 714.69으로 자유도가 26이고 유의수준 5%인 경우의 χ^2 값(38.9)보다 크므로 우리나라의 일별 강수발생에 대한 마르코프 연쇄성질이 공간적으

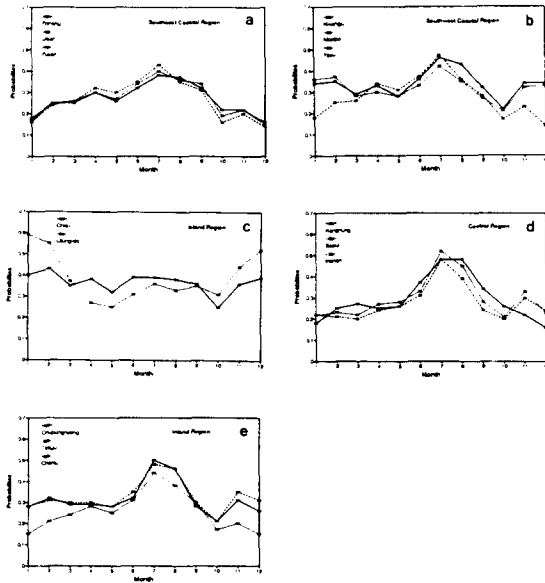


Fig. 1. The equilibrium probabilities of wet day for Case B in the (a) southeast coastal region, (b) southwest coastal region, (c) island region, (d) central region, and (e) inland region.

로 비균질하다고 가정할 수 있었다.

3.3 균형확률

각 경우별 균형확률에서 π_0 값, 즉 초기일의 날씨조건에 관계없이 일별 강수발생의 확률이 A경우는 0.31, B경우는 0.30 그리고 C경우는 0.29로서 자료의 기간이 짧은 C경우가 일별 강수발생의 확률이 가장 낮았다. 또 계절별 균형 확률치는 겨울이 0.23~0.28의 범위로 가장 낮았고 여름이 0.39이상으로 가장 높게 나타났다(Table 7).

Table 8은 각 지점에 대한 균형확률을 구한 것이다. 강수일의 균형확률값은 모든 경우에 대해 산악지역인 추풍령, 남서 해안지역인 광주, 전주, 목포 그리고 섬지역인 울릉도와 제주에서 0.30이상으로 다른 지점들보다 높게 나타났다. 이들 분포에서 최대값은 울릉도의 0.38~0.39의 범위이고 최소값은 대구의 0.25~0.26이었다. 다시 말해 전날에 관계없이

일년중에서 일별 강수발생의 확률은 울릉도에서 가장 높았고 대구에서 가장 낮았다. 그리고 C경우는 다른 두 경우에서보다 일별 강수발생의 확률이 울릉도와 제주에서 다소 낮게 나타나 A와 B경우와 달랐다.

월별 균형확률을 Table 9에 나타내었다. 강수일의 요소는 7월에 0.44~0.55로 가장 높았고 10월에 0.19~0.24로 가장 낮았으며 난후기(4월-9월)동안이 한후기(10월-이듬해 3월)보다 다소 높게 나타났다. 이러한 사실은 난후기가 한후기보다 강수일이 빈번함을 의미한다. 그리고 A 경우의 4월에 0.40으로 다른 경우보다 높게 나타난 반면에 C경우의 10월은 0.19로 다른 경우보다 낮게 나타났다.

Fig. 1은 각 지역별 강수일의 요소에 대한 월별 균형확률중에서 B경우를 예로서 나타낸 것이다. 남동해안지역에서 강수일의 요소에 대한 균형확률의 최소값은 12월에, 최대값은 7월에 보였으며 10월에 지점간 균형확률값의 차이가 크게 나타났다(Fig. 1a). 남서해안지역도 마찬가지로 7월에 최대값이 출현하였으며 동계의 여름은 다른 지점들보다 다소 낮은 확률값이 나타났다(Fig. 1b). 섬지역인 제주와 울릉도의 월별 분포를 살펴보면 울릉도의 1월과 제주의 2월에 각각 가장 높게 나타났으며 최소값은 울릉도의 5월에, 제주의 10월에 나타났다(Fig. 1c). 그리고 전체적으로 다른 지역과 다른 분포를 보였다. 우리나라의 중부지역은 앞에서 설명한 남동해안지역과 유사하며 서해안에 위치한 서울과 인천은 11월에 강릉보다 다소 높은 확률이 나타났으며, 강릉은 2월과 3월에 다소 높은 확률이 나타났다(Fig. 1d). 내륙지점들중 추풍령과 전주의 월별분포가 아주 유사하며 대구는 전체적으로 두 지점보다 다소 낮은 확률을 보였다. 이는 영남내륙에 위치한 대구의 강수발생의 빈도가 다른 두 지점보다 작음을 의미한다. 각 지점별 특성을 종합해 보면 남서 해안지역과 섬지역, 즉 울릉도, 광주, 전주 및 제주가 겨울에 다소 큰 확률을 가짐을 알 수 있었다. 특히 울릉도는 여름보다 겨울에 균형확률값이 0.30정도 크게 나타났다.

3.4 날씨순환

Table 10은 식(8)과 (9)의 강수일과 무강수일의 기간 및 식(12)의 날씨순환의 연별과 계절별

Table 10. The annual and seasonal probabilities of wet and dry day spells, mean recurrence time and weather cycle for each case

[A]

Period	State	n Spell																			Mean	Weather Cycle	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19			
Annual	W	.49	.25	.13	.06	.03	.02	.01													2.04	6.59	
	D	.22	.17	.13	.10	.08	.06	.05	.04	.03	.02	.02	.01	.01	.01	.01	.01	4.55					
Spring	W	.55	.25	.11	.05	.02	.01													1.82	6.17		
	D	.23	.18	.14	.11	.08	.06	.05	.04	.03	.02	.02	.01	.01	.01	.01	4.35						
Summer	W	.42	.24	.14	.08	.05	.03	.02	.01													2.38	6.08
	D	.27	.20	.14	.11	.08	.06	.04	.03	.02	.02	.01	.01	.01	3.70								
Autumn	W	.53	.25	.12	.06	.03	.01	.01													1.89	6.89	
	D	.20	.16	.13	.10	.08	.07	.05	.04	.03	.03	.02	.02	.01	.01	.01	.01	.01	5.00				
Winter	W	.51	.25	.12	.06	.03	.01	.01													1.96	7.52	
	D	.18	.15	.12	.10	.08	.07	.05	.04	.04	.03	.02	.02	.02	.01	.01	.01	.01	.01	5.56			

[B]

Period	State	n Spell																			Mean	Weather Cycle		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19				
Annual	W	.50	.27	.11	.05	.03	.02	.01													1.99	6.57		
	D	.22	.17	.13	.10	.08	.06	.05	.04	.03	.02	.02	.02	.01	.01	.01	.01	.01	4.58					
Spring	W	.57	.30	.09	.03	.01													1.63	5.74				
	D	.22	.18	.14	.11	.09	.06	.05	.04	.03	.02	.01	.01	.01	.01	4.10								
Summer	W	.42	.26	.13	.07	.04	.03	.02	.01	.01													2.39	6.22
	D	.27	.19	.14	.10	.08	.06	.04	.03	.02	.02	.01	.01	.01	.01	3.84								
Autumn	W	.49	.27	.12	.05	.03	.02	.01	.01													2.03	7.00	
	D	.21	.16	.13	.10	.08	.06	.05	.04	.03	.03	.02	.02	.02	.01	.01	.01	.01	.01	.01	4.97			
Winter	W	.51	.25	.11	.06	.03	.02	.01	.01													2.02	7.28	
	D	.20	.15	.12	.09	.08	.06	.05	.04	.03	.03	.02	.02	.02	.01	.01	.01	.01	.01	.01	5.27			

[C]

Period	State	n Spell																		Mean	Weather Cycle				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						
Annual	W	.51	.27	.11	.05	.03	.01	.01													1.89	6.54			
	D	.22	.17	.13	.10	.08	.06	.05	.04	.03	.02	.02	.02	.01	.01	.01	.01	.01	.01	4.65					
Spring	W	.57	.28	.09	.04	.01													1.63	5.79					
	D	.21	.18	.14	.10	.09	.07	.05	.04	.03	.02	.02	.01	.01	.01	.01	4.16								
Summer	W	.42	.26	.13	.08	.04	.03	.02	.01	.01	.01													2.38	6.43
	D	.26	.19	.13	.10	.07	.06	.04	.03	.02	.02	.01	.01	.01	.01	.01	.01	.01	4.05						
Autumn	W	.55	.26	.11	.04	.02	.01													1.79	7.05				
	D	.18	.15	.12	.09	.08	.06	.05	.04	.03	.03	.02	.02	.01	.01	.01	.01	.01	.01	5.26					
Winter	W	.58	.26	.09	.04	.02	.01													1.70	6.49				
	D	.21	.17	.13	.10	.08	.06	.05	.04	.03	.02	.02	.02	.01	.01	.01	.01	.01	.01	4.79					

확률을 보인 것이다. 강수일과 무강수일 기간의 연별 길이(annual length)는 7일부터 17~18일까지의 범위에 분포하였으며, 식(10)의 연평균 강수일의 기간은 A 경우는 2.04로 가장 길었고 그 다음이 B 경우는 1.99일이었다. 그리고 C 경우는 1.89일로 다른 경우보다 짧게 나타났다. 계절별 분포를 살펴보면 여름의

경우 강수일의 기간이 8~10일이었으며, 반면에 봄의 경우는 5~6일로 나타났다. 또한 강수 지속일의 계절별 평균 분포에서 여름은 2.38일 정도로 가장 길고, 봄의 1.63~1.82일로 가장 짧게 나타났다. 특히 A 경우에서 봄의 평균 강수지속일이 다른 경우보다 길게 나타난 반면에 B 경우의 여름, 가을 및 겨울의 평균 강수지속

일이 다른 경우보다 다소 길게 나타났다. 한편 식(11)의 연평균 무강수일의 기간은 4.55~4.65일이며 C 경우에서 가장 길게 나타났다. 계절별로는 겨울에 4.79~5.56일로 가장 길며 그 중에서 A 경우가 가장 길고 C 경우가 가장 짧다. 여름에 3.70~4.05일로 C 경우에서 가장 길게 나타났다. 평균 강수일과 무강수일의 지속기간으로 보면 연 날씨순환(annual weather cycle)은 6.54~6.59일이며 계절별로는 봄이 5.74~6.17로 가장 짧았고 가장 긴 날씨순환은 A와 B경우에서 겨울에, C 경우는 가을에 나타났다. 이같은 날씨주기는 우리나라에 영향을 주는 기압계 예를들면 봄과 가을의 이동성 고기압의 통과주기와 밀접한 관계가 있을 것으로 보인다.

4. 요약 및 결론

우리나라의 일별 강수발생에 마르코프 연쇄성질을 세경우의 연구기간에 적용하여 월별, 계절별 및 지점별 추이확률과 주기성을 조사하고 각 기간에 대한 마르코프 연쇄성질의 반응을 알아본 결과는 다음과 같다.

1. 우리나라의 일별 강수발생은 1차 마르코프 연쇄성질을 가지며, 모든 지점에서 시간에 대한 정상성과 공간에 대한 비 균질성이 나타났다.

2. 강수일에서 강수일 및 무강수일로의 추이확률은 모두 0.50부근이었고, 무강수일에서 무강수일 및 강수일로의 추이확률은 각각 0.78~0.79과 0.21~0.22의 분포를 보였으며 앞의 경우가 약 3.5배정도로 크게 나타났다.

3. 모든 경우에서 강수일에서 강수일로의 추이확률은 여름철 특히 7월에 가장 높고 지점별로는 울릉도에서 가장 높게 나타났으며 가장 낮은 추이확률은 0.44~0.45인 인천이었다.

4. 연평균 균형확률값은 자료의 기간이 짧은 C경우가 일별 강수발생의 확률이 가장 낮았다. 또 계절별 균형확률값은 겨울이 0.23~0.28의 범위로 가장 낮았고 여름이 0.39이상으로 가장 높게 나타났다.

5. 강수일의 요소에 대한 균형확률값은 모든 경우에서 산악지역인 추풍령, 남서 해안지역인 광주, 전주, 목포 그리고 섬지역인 울릉도와 제주에서 0.30이상으로 다른 지점들보다

높게 나타났으며 월별로는 7월에 0.44~0.55로 가장 높았고 10월에 0.19~0.24로 가장 낮았다.

6. 평균 강수일과 무강수일의 지속기간으로 보면 연 날씨순환은 6.54~6.59일이었으며 계절별로는 봄이 5.74~6.17로 가장 짧았고 가장 긴 날씨순환은 A경우와 B경우에서는 겨울에, C 경우는 가을에 나타났다.

이상으로 자료의 시종이 다른 30년간을 사용한 A와 B경우는 대체로 유사한 결과를 보였지만 최근 10년간 63개 지점을 고려한 C경우는 강수일에서 무강수일로의 추이확률이 특히 가을과 겨울에 다른 경우보다 높았고 무강수일에서 무강수일로의 월별, 계절별 추이확률과 균형확률에서도 약간이 차이가 있었다. 이것은 최근 국지적으로 일어나는 가뭄과 홍수현상 그리고 도시화에 따른 기후변화를 반영한 것으로 보인다. 또한 자료기간이 30년인 경우 자료의 시종에 따른 마르코프 연쇄성질의 반응이 크게 민감하지 않았다. 더 나아가 1900년대초부터 강수관측이 시작된 서울, 인천, 대구, 목포 및 부산지점의 일강수량 자료에 마르코프 연쇄성질을 적용한다면 흥미있는 연구가 될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 1995년도 선도기술개발사업 "산성비 감시 및 예측기술 개발"에 의해 수행된 연구결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

- 권오웅, 이동규, 1988, 한국의 강수확률예보에 관한 연구, 한국기상학회지, 24(3), 44-56.
- Anderson, T. W. and L. A. Goodman 1957, Statistical inference about Markov chains, Ann. Math. Stat., 28, 89-110.
- Chin, E. H. 1977, Modelling daily precipitation occurrence process with Markov chain. Water Resources. Res., 13, 949-956.
- Cox, D. R., and H. D. Miller, 1965, The Theory of Stochastic Processes, John Wiley and Sons, New York, 398pp.
- Gabrial, K. R., and J. Neumann 1962, A Markov chain model for daily rainfall

- occurrence at Tel Aviv, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 88, 90-95.
- Gates, P. and H. Tong, 1976, On Markov chain modelling to some weather data. *J. Appl. Meteor.*, 15, 1145-1151.
- Glahn, H. R. and D. A. Lowry, 1972, The use of model output statistics(MOS) in objective weather forecasting, *J. Appl. Meteor.*, 1, 13-17.
- Harbaugh, J. W. and G. Bonham-Charter 1981, *Computer Simulation in Geology*, R. E. Krieger Pub. Co., 575pp.
- Kang, Y. Q., 1987, Markov Chain Model for daily amount of cloud in Korea. *J. of Korean Met. Soc. Korea*, 22(3), 1-11.
- Kang, Y. Q. and Y. Gong, 1987, Markov chain properties of sea surface temperature anomalies at the southeastern coast of Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 22(2), 57-62.
- Katz, R. W. 1977, Precipitation as a chain-dependent process, *J. of Applied Meteorol.*, 16, 671-676.
- Katz, R. W., 1985, Probabilistic models. In: A. H. Murphy and R.W. Katz (Editors), *Probability, Statistics, and Decision Making in the Atmospheric Sciences*. Westview Press, Boulder, pp. 216-288
- Moon, S. E., S. B. Ryoo, and J. G. Kwon, 1994, A Markov chain model for daily precipitation occurrence in South Korea, *Int. J. of Climatology*, 14, 1009-1016.
- Selby, S. M. 1971, *Standard Mathematical Tables*, 15th Edition, Chemical Rubber Co., 664pp.
- Todorovic, P., and D. A. Woolihiser 1975: A Stochastic model of n-day precipitation, *J. of Applied Prob.*, 12, 488-497.