

## 일강우자료의 다지점 모의 발생을 위한 간단한 방법 제안

## A Proposed Simple Method for Multisite Point Rainfall Generation

유철상\* / 이동률\*\*

Yoo, Chulsang / Lee, Dong-Ryul

## Abstract

In this study we proposed a simple method for generating multi-site daily rainfall based on the 1-order Markov chain and considering the spatial correlation. The occurrence of rainfall is simulated by a simple 1st-order Markov chain and its intensity to be chosen randomly from the observed data. The spatial correlation between sites could be conserved as the rainfall intensity at each site is to be chosen consistently with the target site in time through generation. It is found that the generated daily rainfall data reproduce general characteristics of the observed data such as average, standard deviation, average number of wet and dry days, but the clustering level in time is somewhat loosened. Thus, the lag-1 correlation coefficient of the generated data gave smaller value than the observed, also the average lengths of wet run and dry run and the wet-to-wet and dry-to-dry probabilities were a bit less than the observed. This drawback seems to be overcome somewhat by choosing a proper site representing overall basin characteristics or by use of more detailed states of rainfall occurrence.

*keywords:* daily rainfall, Markov chain, spatial correlation, multi-site generation

## 요 지

본 연구에서는 마코프 연쇄에 근거하며 지점간 공간상관을 적절히 고려할 수 있는 일강우의 다지점 모의 발생 방법을 제안하였다. 유역 내 여러 지점 중 대표지점을 선정하여 강우의 발생은 간단한 1차 마코프 연쇄에 의해 모의되도록 하였고 강우강도는 과거자료에서 무작위하게 추출하는 방법을 적용하였다. 지점간 공간상관은 모든 지점에 대해 강우강도가 대표지점과 같은 시점의 것이 일관되게 선택되도록 함으로서 그대로 유지시킬 수 있었다. 모의된 일강우자료는 평균, 분산이나 평균 무강우일수, 강우일수 등의 강우 특성은 잘 재현함을 알 수 있었으나, 원자료의 군집특성(시간축에서의)은 상대적으로 약화되어 1일 지체 상관계수가 원자료의 경우보다 작게 나타나고 있으며 아울러 평균 강우지속일수 및 무강우지속일수, 강우-강우 확률 및 무강우-무강우 확률이 원자료의 그것보다 약간 작게 나타남을 파악할 수 있었다. 그러나 이러한 단점은 유역을 대표할 수 있는 지점을 적절히 선택함으로써 또한 대표지점에 대한 강우발생의 상태를 무강우-강우에서 좀더 세분화함으로써 어느 정도 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어 :** 일강우, 마코프 연쇄, 공간상관, 다지점 모의 발생

\* 고려대학교 환경공학과 조교수

Assistant Prof., Dept. of Environmental Eng., Korea Univ., Chungnam 339-700, Korea

\*\* 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원

Senior Researcher, Water Resources and Environmental Research Div., KICT, Koyang, Kyonggi 411-410, Korea

## 1. 서 론

일강우자료는 유역의 물수지 분석과 같은 강우-유출의 장기해석에 입력자료로 이용된다. 이러한 일강우자료는 관측치가 풍부하게 존재할 경우 이 자료를 이용하여 소기의 목적을 달성할 수 있으나 그렇지 못할 경우 부득이 자료의 확충을 위해 일강우의 모의 발생이 필요하게 된다. 이 경우에는 물론 과거 강우의 특성 및 경향이 일정하게 유지된다는 추계학적 과정의 정상성을 근거로 하게 된다. 국내의 경우 일강우자료는 많게는 100여년 정도에서부터 적게는 10여년 정도까지 다양한 길이로 존재하고 있다. 보다 정도 있는 유출해석을 위해서는 유역 내 균등하게 분포된 일정기간 이상의 일강우자료를 필요로 하며 국내의 경우 현실적으로 일강우자료의 모의발생은 빼놓을 수 없는 부분이다.

일반적으로 어떤 자료의 모의발생을 위해서는 기존 자료의 분석 및 특성화, 모형의 결정 및 매개변수 추정, 자료의 모의발생의 일련의 순서를 따른다. 유출량이나 월평균강우자료와 같이 연속적인 과정을 가정할 수 있는 경우는 보통 Box-Jenkins의 기법을 적용하여 모의발생을 수행할 수 있다. 그러나 일강우량자료와 같은 불연속 과정의 자료는 이 경우에 적용되지 않는다. 이는 강우가 다른 수문자료와 비교할 때 다른 구조상의 차이 때문인데, 그중 대표적인 것이 강우의 불연속성이다. 즉, 강우는 간헐적으로(intermittently) 발생하므로 연속성이 없다. 월, 계절 또는 연강우량 자료를 다루지 않는 이상 강우자료에는 다수의 "0", 즉 무강우 기록들을 포함하게 된다. 이러한 특성이 보통 일강우나 그 이하의 시간간격을 갖는 강우자료를 일반적인 추계학적 기법(보다 엄밀히 말하면 시계열 분석)을 통해 분석하고 예측 또는 모의하는 것을 어렵게 만드는 요인이 된다. 따라서 일반적으로 시계열 분석에 많이 이용되는 Box-Jenkins의 기법들은 이 경우에 적용되지 못한다. 따라서 강우모형은 추계학적 과정인 포아송과정이나 마코프연쇄에 근거하는 것이 일반적이다.

둘째, 강우는 그 구조상 군집 특성을 가지고 있다. 즉, 강우는 시간축이나 공간축에서 무작위하게 위치하지 않고 서로 관련되어 뭉쳐 있는 경향을 보인다. 이러한 특성은 비단 강우에만 국한되는 것은 아니다. 실제로 거의 대부분의 자연현상에서 찾아볼 수 있다. 이러한 특성을 추계학적 기법을 이용해서 나타내는 것 또한 쉬운 일은 아니나 근래에 들어 점강우모형에 여러 가지 기법들이 도입되고 있다.

이와 같은 특성을 갖는 강우의 도의 발생을 위해서는 기존의 점강우모형을 이용할 수 있다. 예를 들어, 포아송과정 (Poisson process)이나 마코프 연쇄 (Markov-chain)에 근거한 모형이 그것이다. 포아송 과정에 근거한 모형을 이용하는 경우는 강우의 발생 시점을 포아송과정에 근거해 결정하고 그 강도나 지속 기간 또는 군집특성은 또 다른 추계학적 과정들로 모의하는 방법이 된다. 모의된 강우는 연속인 시간축에 존재함으로 주어진 시간 단위의 강우로 재구성하는 과정이 필요하게 된다. 이러한 모형을 이용하는 경우 모형의 매개변수는 일반적으로 관측된 강우자료의 1차원 및 2차원 통계특성을 모형의 같은 특성에 연결시킴으로써 추정하게 된다. 반대로 마코프 연쇄에 근거한 모형은 일단위의 강우와 무강우 사이의 전이확률 (transition probability)에 근거하기 때문에 모의발생이 상대적으로 쉽고 그 확률의 추정도 과거 자료의 분석을 통해 쉽게 구할 수 있다. 이따, 강우강도의 결정은 또 다른 추계학적과정을 이용하여 결정하게 된다.

그러나 다지점을 고려하는 경우, 특히 그 지점수가 많은 경우에는 어떤 모형을 사용하더라도 그 매개변수의 추정이 매우 어렵게 된다. 일반적으로 모형의 매개변수 추정에는 행렬의 연산을 포함하는데 그 중에서도 특히 역행렬의 계산이 문제가 된다. 유역내 각 지점간의 공상관(cross-correlation)은 두 지점 사이의 거리뿐만 아니라 고도와 같은 지형조건에도 밀접하게 관계된다. 단순히 거리에 따른 공상관만을 고려하는 경우는 각 지점 강우가 평활화(smoothing) 될 가능성이 크고 또한 원 자료 (raw data)의 분산도(variability)를 각각 따로 맞추어 주어야 하는 문제가 생긴다. 아울러 강우의 공간적인 군집특성도 재현하기 어려워지는 문제가 있다. 이런 측면에서 보면 다차원강우모형(예를 들어, Waymire 등, 1984; Eagleson와 Rodriguez-Iturbe, 1987)을 이용하는 것이 더 현실적일 수 있다. 즉, 강우의 시간적, 공간적 특성을 만족하는 시-공간의 강우자료를 모의하고 필요한 지점의 자료를 추출하는 방법이다 (Valdes 등, 1985). 그러나 문제는 이러한 모형들은 상대적으로 많은 매개변수를 포함하고 있고 또한 모형의 구조가 비선형이라 매개변수의 추정이 어렵다는 것이다.

따라서 본 연구에서 추구하는 목적은 유역내 각 지점간 공간적 상관특성을 적절히 만족시키는 강우자료를 어떻게 간편하게 모의 발생시키느냐 하는 것이다. 물론 모의된 강우자료는 과거자료의 시간적 통계특성

도 만족시켜야 한다. 즉, 무강우일수 및 강우일수, 무강우 지속일수 및 강우 지속일수와 같은 특성도 재현되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 특성을 만족시키기 위해 상대적으로 모의가 편리한 1차 마코프 연쇄에 근거하여 강우의 발생을 결정하고 강우의 강도는 원자료의 분포를 그대로 재현하며 아울러 공간상관도 적절히 재현할 수 있는 방법을 제안해 보고자 한다. 이 방법은 그 적용성을 검토하기 위해 임의로 선택한 금강유역의 17개 지점에 적용하여 과거강우자료와 특성을 비교 분석하였다.

## 2. 점강우모형에 대한 고찰

### 2.1 포아슨과정에 기초한 모형

포아슨 과정에 근거한 강우모형은 강우의 발생을 포아슨과정으로 모의하는 것을 기본으로 하는 모형이다. 예를 들면, Rodriguez-Iturbe 등 (1984), Rodriguez-Iturbe 등 (1987; 1988), Entekhabi 등 (1989), Islam 등 (1990)이 대표적인 연구이며 이 모형들의 일반적인 구조는 강우의 발생은 포아슨과정을 따르고, 강우강도와 지속기간은 일반적으로 지수분포를 따른다고 가정하는 것이다. 이러한 지수분포의 가정은 모형의 이론적 해석을 쉽게 한다는 장점 때문에 많이 채택되고 있다. 실제의 강우강도를 모의하는데는 감마( $\gamma$ )분포가 가장 적절한 단일분포로 알려져 있으나 이 경우에는 모형의 2차원 통계특성의 유도와 같은 이론적 해석이 어려운 것으로 알려져 있다. 최근에는 강우강도를 두 개의 지수분포를 혼합한 형태인 혼합지수분포 (mixed exponential distribution)를 사용하여 나타내기도 한다 (Wilks, 1998).

이와 같이 포아슨과정에 근거한 강우모형은 강우의 군집특성을 나타내기 위해 보통 Bartlett-Lewis 과정이나 Neyman-Scott 과정 등을 이용한다 (Rodriguez-Iturbe 등, 1987; Rodriguez-Iturbe 등, 1988). 최근에는 이들의 문제점을 (예를 들면, 평균 무강우 지속일수가 관측치에 비해 작게 나타나는 것과 같은) 개량한 형태인 Modified Neyman-Scott 과정 (Entekhabi 등, 1989)이나 Modified Bartlett-Lewis 과정 (Islam 등, 1990) 등이 이용되기도 한다. 포아슨과정에 기초하며 이러한 강우의 특성을 반영한 모형들을 그 조합의 형태에 따라 Rectangular Pulse Model, Neyman-Scott Rectangular Pulse Model, Bartlett-Lewis Rectangular Pulse Model,

Modified Neyman-Scott Rectangular Pulse Model, Modified Bartlett-Lewis Rectangular Pulse Model 등으로 불리고 있다.

### 2.2 마코프 연쇄에 기초한 모형

마코프 연쇄에 근거한 모형은 일단위의 강우와 무강우 사이의 전이확률(transition probability)에 근거하여 강우의 발생 유무를 결정하는 것을 기초로 하는 모형이다. 이 모형은 강우의 모의발생이 상대적으로 쉽고 그 확률의 추정도 과거 자료의 분석을 통해 상대적으로 쉽게 할 수 있다는 장점이 있다. 아울러 이 모형을 이용한 강우 또는 무강우 일의 발생은 일단위와 같이 주어진 시간단위로의 순차적 모의가 가능하기 때문에 포아슨 과정에 근거한 모형과 같이 주어진 시간단위로 모의 결과를 재구성해야 하는 번거로움이 없다. 또한 마코프 연쇄에 근거한 모형은 주어진 전이확률에 따라 강우 또는 무강우사상이 결정되기 때문에 강우의 군집 특성을 고려해 주는 과정을 따로 고려하지 않는 것이 일반적이다.

강우강도 결정을 위해서는 포아슨과정에 기초한 모형에서와 마찬가지로 지수분포나 감마 분포, 혼합지수 분포 등을 이용할 수 있다. 간혹, 강우강도를 그 정도에 따라 많은 상태로 분류한 후 각각의 경우에 대한 전이확률을 구함으로써 일강우자료를 모의하기도 하는데 이 경우는 행렬의 크기가 커져서 그 연산이 어렵게 되는 단점이 있다.

마코프 연쇄에 기초한 점강우모형은 Todorovic와 Woolhiser (1975), Katz (1977), Waymire와 Gupta (1981), Stern과 Coe (1984), Wilks (1998) 등에서 찾아 볼 수 있으며 본 연구에서는 Katz (1977)와 Wilks (1998)의 강우발생과정에 대해서만 간단히 살펴보기로 한다. 먼저  $k$ 번째 일에 발생하는 강우 또는 무강우 사상을 나타내는  $X_t$ 를 정의해 보자.

$$X_t = \begin{cases} 0, & \text{if day } t \text{ is dry} \\ 1, & \text{if day } t \text{ is wet} \end{cases} \quad (1)$$

이 경우 강우량 계열  $Y_t$ 는 강우량을 나타내는  $R_t$ 를 곱하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_t = R_t X_t \quad (2)$$

즉,  $Y_t$ 는  $X_t$ 가 0일 경우 0의 값(무강우)을 갖고  $X_t$ 가 1일 경우  $R_t$ 의 값을 갖는다. 현재의 강우 발

생확률이 바로 전달의 강우 유무에 의해서 결정된다고 가정하면  $X_t$ 는 1차 마코프 연쇄모형을 따르게 되고, 강우 또는 무강우 확률은 다음 4가지의 경우로 나타낼 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} \Pr\{X_t = 1 | X_{t-1} = 0\} &= p_{01} \\ \Pr\{X_t = 1 | X_{t-1} = 1\} &= p_{11} \\ \Pr\{X_t = 0 | X_{t-1} = 0\} &= p_{00} \\ \Pr\{X_t = 0 | X_{t-1} = 1\} &= p_{10} \end{aligned} \quad (3)$$

위 식은 각각  $t-1$ 일이 무강우인 경우와 강우인 경우에  $t$ 일 강우가 발생할 조건부 확률 및 무강우일일 조건부 확률을 나타낸다. 따라서  $p_{00} = 1 - p_{01}$  이고  $p_{11} = 1 - p_{10}$ 이다.

1차 마코프 연쇄에 근거한  $X_t$  계열의 추계학적 모의는 아주 간단하다. 가장 간단하게는 균등분포(uniform distribution)로부터 난수를 발생시키고 식(3)의 확률에 근거해 강우 또는 무강우를 결정하면 된다. 즉, 다음과 같이 강우발생의 한계확률  $p_c$ 를 정의하면

$$p_c = \begin{cases} p_{01}, & \text{if } X_{t-1} = 0 \\ p_{11}, & \text{if } X_{t-1} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

$X_t$  값은 다음과 같이 결정된다.

$$X_t = \begin{cases} 1, & \text{if } u_t \leq p_c \\ 0, & \text{if } u_t > p_c \end{cases} \quad (5)$$

여기서  $u_t$ 는 균등분포,  $U(0, 1)$ 에 의해 발생된 난수를 의미한다. 물론 균등분포 대신에 정규분포와 같은 다른 확률분포함수의 사용도 가능하다. 강우의 강도를 표현하는 방법은 포아슨 과정에서와 마찬가지로 여기서는 생략하기로 한다.

### 2.3 다지점 점강우모형 (Multisite Point Rainfall Models)

다지점 점강우모형은 점강우모형을 지점간의 공간상관(spatial correlation)을 고려하여 확장한 형태를 나타낸다. 예를 들어 마코프 연쇄에 기초한 모형을 다지점으로 확장하는 경우는 강우발생의 공간상관 뿐만 아니라 강우강도의 공간상관도 고려해야 한다. 따라서 그 지점의 수가 많을 경우 지점간 강우발생 및 그 강도의 공간상관을 분석해야 하고 모형의 매개변수 추정도 이

러한 공간상관을 고려하여 수행된다.

다지점 점강우모형을 이용하여 일강우자료를 모의하는 경우 행렬의 연산이 가장 크게 문제가 되며 우리나라와 같이 계절적인 특성이 크게 나타나는 경우는 이와 더불어 각 매개변수의 계절적인 변동특성도 고려해야 되므로 굉장히 번거로운 과정이 된다. 따라서 공간상관을 고려한 많은 지점 강우의 모의발생을 위해서는 좀더 간편하며 또 어느 정도 신뢰도를 제고할 수 있는 방법이 필요하게 된다.

### 3. 마코프 연쇄에 근거한 일강우의 다지점모의 발생

본 연구에서 제안하는 다지점 일강우량 자료의 모의 발생은 간단히 다음과 같은 구조를 가진다. 첫째, 강우의 발생은 앞에서 설명한 것과 같이 1차 마코프 연쇄에 의한다. 이때 필요한 전이확률은 과거 자료의 분석을 통해 쉽게 결정할 수 있다. 둘째, 강우의 강도는 과거의 관측치를 전체 집합으로 하여 무작위하게 선택 결정한다. 이 경우 모의된 결과는 관측치가 많을 경우 강우강도를 감마 분포나 혼합지수분포로 하는 경우와 대동소이할 것이다.

그러나 다지점 모의 발생에는 지점간 공간상관 특성을 보진시켜야 하므로 특히 지점수가 많을 때 문제가 되며 본 연구에서는 이를 간단히 해결하기 위해 원 자료(raw data)의 공간구조를 그대로 사용하는 방법을 선택하였다. 즉, 과거 같은 시점 각 지점 관측치를 하나의 set으로 구성하여 다음과 같이 나타내고,

$$R_t = \{R_t^i, i \in N\}, t = 1 \dots n \quad (6)$$

이때,  $i$ 는 각 지점,  $N$ 은 총 지점의 수를,  $n$ 은 총 자료의 수(기간)를 나타낸다. 아울러 이렇게 구성된 set은 대표지점( $i = p$ )이 강우인 경우의 집합  $R(1)$ 와 무강우인 경우의 집합  $R(0)$ 로 각각 나누게 된다.

$$\begin{aligned} R(1) &= \{R_t^i, i \in N | X_t^i > 0, t = 1 \dots n\} \\ R(0) &= \{R_t^i, i \in N | X_t^i = 0, t = 1 \dots n\} \end{aligned} \quad (7)$$

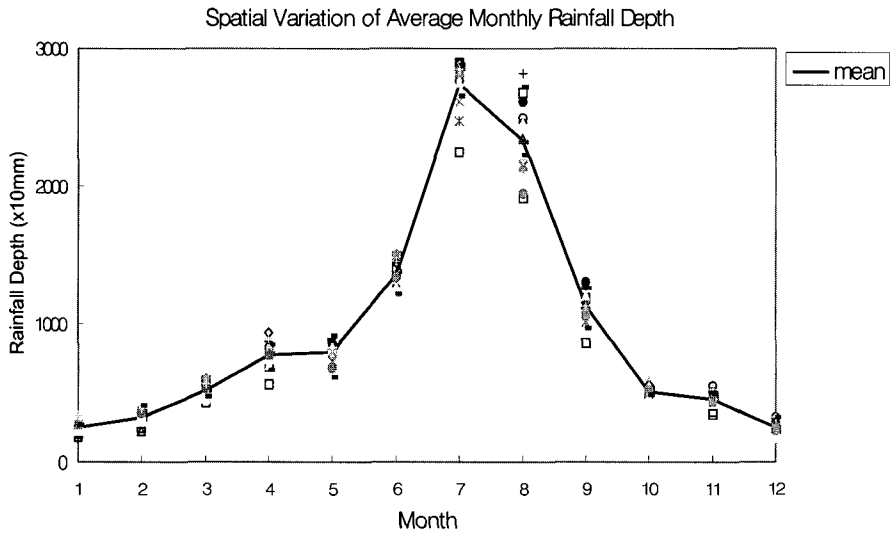
만일 유역의 대표지점에 대해 강우가 발생하는 것으로 결정되면 강우강도는 집합  $R(1)$ 에서 무작위하게 선택되고 따라서 유역의 다른 지점에 대해서도 같은 시점의 자료가 선택되도록 하는 것이다. 대표지점이 무강우를 나타내는 경우도 마찬가지이다. 따라서 대표지점

이 무강우일지라도 다른 지점에서는 강우로 나타날 수가 있으며, 대표지점이 강우를 나타내는 경우에도 다른 지점에서는 무강우로 나타날 수 있다. 과거 관측치가 상대적으로 적은 경우에는 강우의 강도는 감마분포나 혼합지수분포를 이용하여 모의하고 각 지점간 공간 분포특성은 보다 많은 경우가 나타나는 시자료를 이용하여 위와 같은 집합을 구성하여 이용할 수도 있을 것이

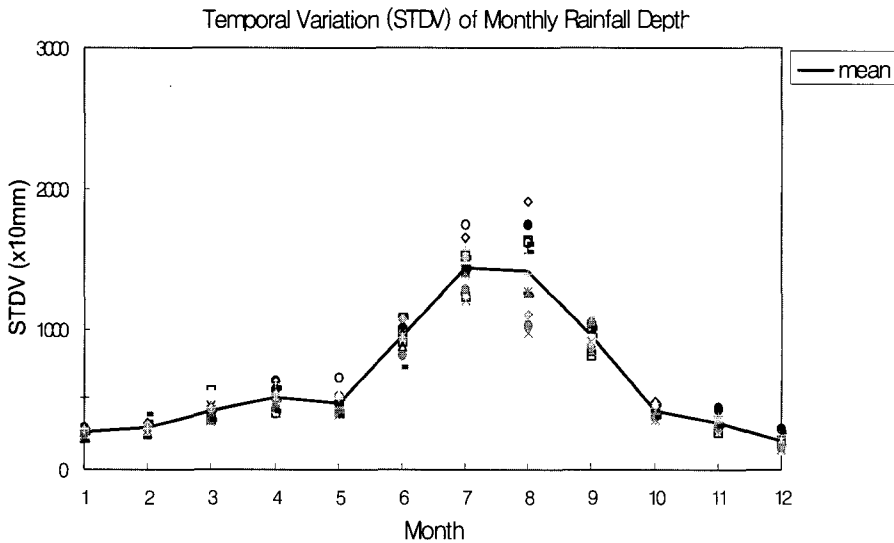
다. 아울러, 일강우의 경우는 그 지속기간이 대체로 2일 이하로 나타내므로 강우에 대한 시간분포의 고려 없이 위와 같은 방법이 적용될 수 있다.

이와 같은 모의 방법을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 유역 내 대표지점 선정 : 유역의 중심에 위치한 지점을 선정
- (2) 대표지점의 강우-강우, 무강우-무강우의 확률



(a) 공 간



(b) 시 간

그림 1. 금강유역 월강수의 변동특성 : 실선 주위의 기호들은 각 지점에서 추정된 값을 나타낸다

추정

(3) 대표지점 자료를 기준으로 강우를 나타내는 집합  $R(1)$ 과 무강우를 나타내는 집합  $R(0)$ 의 구성

(4) 난수발생을 이용한 대표지점에서의 강우발생 모의 : 1차 마코프 연쇄

(5) 대표지점이 강수로 나타나는 경우는 집합  $R(1)$ 에서, 무강우로 나타나는 경우는  $R(0)$ 에서 강

우강도를 무작위로 추출

(6) 반복시행

우리 나라와 같이 계절성이 강한 경우에는 이 특성을 고려하기 위해 월별모의가 바람직하며 월별로 모의된 자료는 년자료로 재구성하게 된다.

이와 같이 일강우량 자료를 모의 발생시킴에 있어 다음과 같은 자료의 특성이 고려되어야 한다. 그 첫째

표 1. 금강유역 17개 지점의 월평균 무강우 지속일수

위치	월											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
장수	7.8	6.8	6.8	5.2	5.6	4.8	3.7	4.4	6.1	8.5	6.9	6.6
청산	11.0	10.6	7.6	6.8	6.6	5.6	4.5	5.7	8.2	11.5	9.3	10.0
부강	13.7	10.5	7.5	5.5	5.4	4.8	3.3	4.0	6.1	8.0	6.0	11.4
홍산	8.7	7.1	7.5	5.9	6.5	6.1	3.7	4.6	7.1	8.2	5.2	5.6
정안	8.3	7.6	7.1	6.7	6.6	5.9	3.5	4.1	6.5	8.7	6.3	7.5
청양	8.9	7.6	7.3	5.7	5.6	5.4	3.3	3.9	5.8	9.0	5.4	6.0
정산	10.6	9.0	8.5	6.5	7.1	5.5	3.3	4.3	6.7	9.7	7.5	8.1
공주	8.0	6.6	5.6	4.9	4.9	4.8	3.2	3.5	5.1	6.3	4.5	6.6
옥천	6.3	5.5	5.4	4.7	4.7	4.2	3.1	3.6	5.4	7.6	4.5	5.4
모서	9.1	7.1	6.0	5.1	5.9	4.9	3.3	3.8	6.0	7.9	6.6	7.1
강경	10.6	8.5	7.4	6.0	5.9	5.6	3.8	4.7	6.7	10.1	5.4	8.2
연산	6.3	6.5	6.1	5.7	5.6	5.4	3.1	4.1	6.2	7.6	5.8	4.7
추풍령	4.5	4.1	4.2	3.9	4.3	4.2	2.9	3.3	4.9	7.1	4.2	4.1
용담	7.2	6.7	6.0	5.4	5.5	4.5	3.7	4.1	6.3	7.2	5.3	6.6
무주	6.2	5.8	5.0	5.0	5.3	4.3	3.2	3.8	5.7	7.3	5.2	6.4
진안	5.8	5.4	5.3	4.4	4.6	4.2	3.4	3.7	4.7	6.0	4.5	5.3
안성장	5.8	6.2	6.7	6.0	6.2	5.5	3.8	4.7	7.5	9.5	5.7	5.8

표 2. 금강유역 17개 지점의 월평균 강우지속일수

위치	월											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
장수	1.5	1.7	1.6	1.5	1.5	1.8	2.4	2.1	1.9	1.4	1.7	1.6
청산	1.4	1.5	1.4	1.3	1.5	1.6	2.4	2.3	1.7	1.5	1.5	1.3
부강	1.3	1.4	1.3	1.4	1.4	1.5	2.0	1.8	1.7	1.4	1.4	1.3
홍산	1.5	1.5	1.5	1.4	1.5	1.6	2.0	1.9	1.8	1.4	1.7	1.5
정양	1.4	1.5	1.4	1.4	1.5	1.6	2.0	1.8	1.7	1.5	1.5	1.5
청양	1.7	1.6	1.6	1.4	1.5	1.7	2.2	2.0	1.7	1.5	1.6	1.6
정산	1.4	1.3	1.4	1.2	1.4	1.5	1.7	1.7	1.5	1.4	1.3	1.3
공주	1.6	1.5	1.6	1.5	1.5	1.7	2.3	2.2	1.9	1.5	1.7	1.8
옥천	1.6	1.7	1.7	1.6	1.6	1.7	2.4	2.2	1.9	1.6	1.6	1.5
모서	1.5	1.6	1.4	1.5	1.5	1.7	2.3	2.0	1.8	1.6	1.5	1.3
강경	1.5	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.9	1.7	1.4	1.4	1.3	1.4
연산	1.4	1.5	1.4	1.5	1.4	1.6	2.2	2.1	1.7	1.6	1.5	1.3
추풍령	1.8	1.9	1.8	1.6	1.7	1.8	2.9	2.7	2.1	1.8	1.8	1.5
용담	1.5	1.7	1.5	1.6	1.5	1.7	2.4	2.2	1.9	1.6	1.6	1.5
무주	1.5	1.7	1.6	1.6	1.5	1.7	2.4	2.1	1.8	1.6	1.7	1.6
진안	1.8	2.1	2.0	1.6	1.6	1.9	3.0	2.4	2.2	2.0	2.0	1.7
안성장	1.5	1.8	1.7	1.5	1.5	1.8	2.2	2.1	1.6	1.6	1.7	1.6

가 강우자료의 자기상관(auto-correlation)특성이다. 일강우량 자료의 경우 1일 지체 (lag-1 day) 상관계수는 0.1-0.2 정도로 그 자체가 아주 작을뿐더러 실제 강우의 평균지속일수를 고려하는 경우(약 2일 정도) 그 중요성은 상대적으로 덜하지만 모의 발생 후 확인해 볼 필요는 있다. 1일 보다 긴 지체의 경우 상관계수는 거의 유의하지 않으므로 본 연구에서도 고려하지

않았다. 둘째는 강우의 군집특성(시간축에서의)이다. 이러한 특성은 강우자료의 고유한 특성으로 신뢰도 있는 유출 해석을 위해 반드시 보존시켜야 하며, 1차 마코프 연쇄모형에서와 같이 강우의 발생유무를 전이확률을 고려하여 모의함으로써 어느 정도 보존시킬 수 있으리라 판단된다.

표 3. 금강유역 17개 지점의 무강우-무강우 확률, p00

위치	월											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
장수	0.78	0.76	0.77	0.75	0.77	0.76	0.66	0.69	0.81	0.86	0.76	0.76
청산	0.91	0.91	0.87	0.85	0.85	0.82	0.78	0.82	0.88	0.91	0.89	0.90
부강	0.93	0.91	0.87	0.82	0.82	0.80	0.70	0.75	0.84	0.88	0.84	0.92
홍산	0.89	0.86	0.86	0.83	0.85	0.84	0.73	0.79	0.87	0.88	0.80	0.82
정안	0.88	0.87	0.86	0.85	0.85	0.83	0.72	0.76	0.86	0.89	0.84	0.87
청양	0.89	0.87	0.86	0.82	0.82	0.82	0.70	0.74	0.84	0.89	0.82	0.85
정산	0.91	0.89	0.89	0.85	0.86	0.82	0.70	0.77	0.86	0.90	0.87	0.88
공주	0.88	0.85	0.85	0.79	0.80	0.80	0.69	0.71	0.81	0.84	0.78	0.86
옥천	0.84	0.82	0.82	0.78	0.79	0.77	0.68	0.72	0.82	0.87	0.78	0.82
모서	0.89	0.86	0.84	0.80	0.83	0.80	0.70	0.74	0.84	0.87	0.85	0.86
강경	0.91	0.89	0.86	0.83	0.83	0.82	0.74	0.79	0.86	0.90	0.82	0.88
연산	0.84	0.85	0.84	0.82	0.82	0.82	0.70	0.76	0.85	0.87	0.83	0.79
추풍령	0.78	0.76	0.77	0.75	0.77	0.76	0.66	0.69	0.81	0.86	0.76	0.76
용담	0.86	0.86	0.83	0.81	0.82	0.78	0.74	0.75	0.85	0.86	0.81	0.85
무주	0.84	0.83	0.80	0.79	0.82	0.77	0.69	0.74	0.84	0.86	0.81	0.84
진안	0.83	0.82	0.82	0.77	0.79	0.76	0.71	0.73	0.80	0.84	0.78	0.82
안성장	0.83	0.84	0.85	0.83	0.84	0.82	0.74	0.79	0.88	0.89	0.82	0.83

표 4. 금강유역 17개 지점의 강우-강우 확률, p11

위치	월											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
장수	0.33	0.40	0.35	0.34	0.33	0.45	0.58	0.53	0.45	0.31	0.41	0.36
청산	0.30	0.36	0.29	0.23	0.34	0.39	0.59	0.57	0.43	0.32	0.32	0.23
부강	0.25	0.29	0.25	0.30	0.31	0.34	0.52	0.46	0.40	0.28	0.27	0.20
홍산	0.35	0.34	0.32	0.30	0.31	0.38	0.51	0.48	0.43	0.30	0.42	0.35
정안	0.27	0.32	0.29	0.30	0.32	0.40	0.51	0.45	0.40	0.34	0.35	0.35
청양	0.42	0.38	0.38	0.27	0.35	0.44	0.56	0.50	0.42	0.33	0.38	0.36
정산	0.28	0.21	0.29	0.20	0.28	0.34	0.40	0.40	0.31	0.31	0.26	0.22
공주	0.36	0.35	0.36	0.35	0.34	0.44	0.58	0.54	0.46	0.34	0.43	0.43
옥천	0.38	0.40	0.40	0.38	0.39	0.44	0.60	0.57	0.47	0.36	0.38	0.35
모서	0.32	0.38	0.31	0.35	0.33	0.42	0.58	0.52	0.44	0.38	0.36	0.21
강경	0.33	0.32	0.24	0.21	0.23	0.23	0.47	0.40	0.30	0.31	0.22	0.28
연산	0.30	0.34	0.31	0.33	0.29	0.39	0.54	0.52	0.40	0.37	0.36	0.23
추풍령	0.43	0.49	0.44	0.39	0.42	0.48	0.66	0.63	0.51	0.46	0.47	0.33
용담	0.33	0.41	0.36	0.37	0.33	0.44	0.58	0.56	0.49	0.37	0.39	0.35
무주	0.33	0.41	0.37	0.38	0.35	0.43	0.59	0.52	0.45	0.40	0.41	0.38
진안	0.44	0.52	0.49	0.41	0.38	0.47	0.66	0.58	0.54	0.52	0.50	0.42
안성장	0.36	0.45	0.41	0.32	0.32	0.44	0.55	0.53	0.37	0.39	0.41	0.37

## 4. 적용 예

### 4.1 유역의 선정

본 연구는 대청댐이 있는 금강유역을 대상으로 하였다. 금강유역은 한반도의 중서부에 위치하며 충청남도, 충청북도의 약 절반과 전라북도의 약 1/4을 점하고 경

기도 및 경상북도 일부를 점하는 유역 면적 9,886km<sup>2</sup>의 대유역으로서 대략 남한면적의 1/10정도인 남한 제3의 유역이며 본류의 유로 연장이 393.9km에 이른다(한국수자원공사, 1992). 현재 금강유역 내에는 30년 이상 일강우 기록이 있는 관측지점이 30여 개소 이상 있으며 본 연구에서는 이들 중 17개 지점(정양, 부강, 청양, 정산, 공주, 옥천, 청산, 모서, 홍산, 강경, 연산,

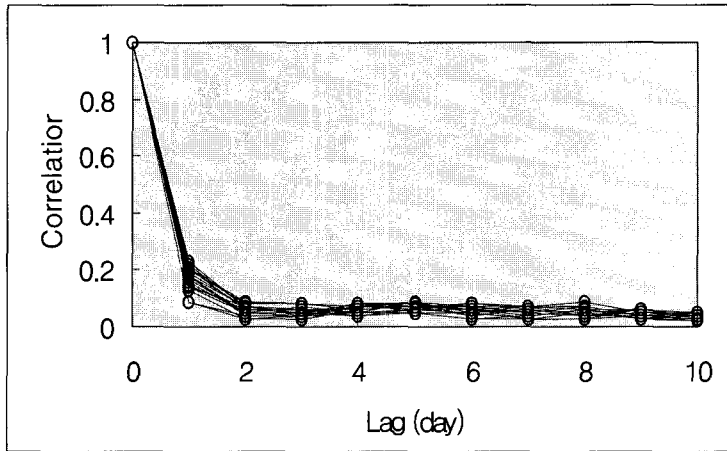


그림 2. 금강유역 17개 지점 일강우자료의 자기상관 특성

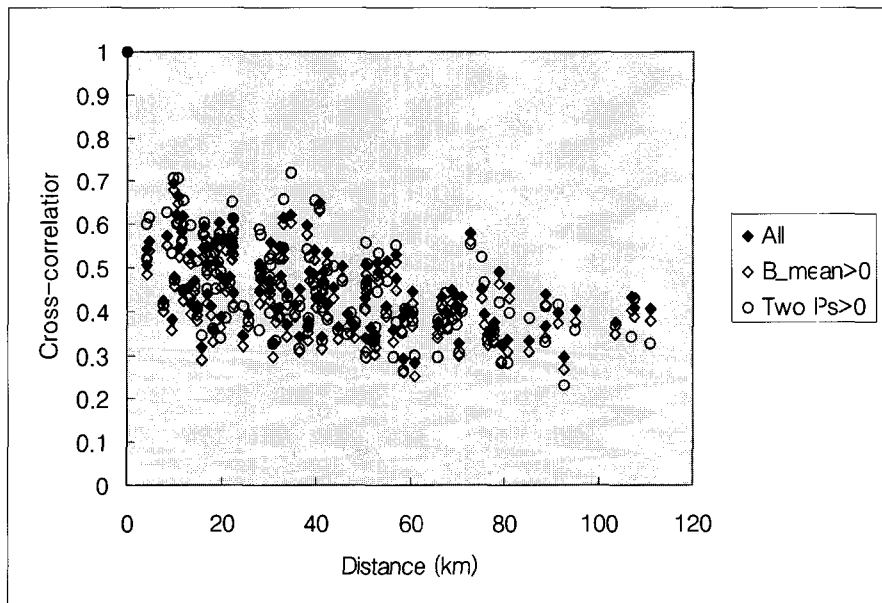


그림 3. 금강유역 17개 지점 일강우자료의 공간상관 특성  
(전체자료를 이용한 경우(All), 유역 내 강우가 있는 경우(B\_mean>0), 두 지점에 모두 강우가 관측된 경우(Two Ps>0))



추풍령, 용담, 무주, 진안, 안성장, 장수)을 임의로 선정하여 연구에 이용하였고 모의에 필요한 대표지점으로 는 대체로 유역 중앙에 위치한 공주지점을 선정하였다.

## 4.2 금강유역 일강우 자료의 기본 특성

### 4.2.1 월평균 및 분산

그림 1은 금강유역의 17개 지점 일강우량 자료를 각 지점별로 월별 평균하고 또 이 지점자료를 산술 평균하여 함께 도시한 그림이다. 이 그림에서는 각 지점의 30개년에 대한 월평균 강우량이 공간적으로 큰 차이가 없음을 나타내고 있다는데 주목할 필요가 있다. 이러한 결과는 공간적으로 균질성을 보이는 유역내의 강우가 짧은 시간축에서는 큰 변동성을 나타내지만 장기간 평균과 같이 긴 시간축에서는 어떤 일관된 특성을 보여준다는 것을 나타낸다. 그림 1(b)에 나타낸 것과 같이 각 지점 월강우량의 시간축에서의 변동은 공간축에서보다 월등히 큰 값을 나타내는데 이는 연강우량의 변동을 월강우량이 나누어 가지고 있기 때문으로 판단된다.

### 4.2.2 월평균 무강우 지속일수 (Dry Run) 및 강우지속일수 (Wet Run)

금강유역 각 지점의 월평균 무강우 지속일수 및 강우지속일수는 표 1 및 2와 같다. 표에서 볼 수 있듯이 각 지점별 변동은 작은 편이나 계절별로는 그 변동폭이 우기와 건기에 대해 뚜렷한 차이를 나타냄을 발견할 수 있다. 이는 그림 1에 나타난 결과처럼 금강유역내 강우가 공간적으로 산지효과 (orographic effect) 등과 같은 비균질성(nonhomogeneity)을 작게 포함하고 있음을 나타낸다고 볼 수 있다.

### 4.2.3 월평균 조건부 강우확률: $p_{00}$ , $p_{11}$

금강유역 각 지점의 월평균 무강우-무강우 확률,  $p_{00}$  및 강우-강우 확률,  $p_{11}$ 은 표 3 및 4와 같다. 표에서 볼 수 있듯이 각 지점별 변동은 작은 편이며 계절별로 본 지점별 변동폭은 월평균 무강우 지속일수 및 강우지속일수처럼 우기나 건기에 뚜렷한 차이를 나타냄을 발견할 수 있다.  $p_{01}$ 과  $p_{10}$ 은 다음의 관계, 즉,  $p_{01}=1-p_{00}$ ,  $p_{10}=1-p_{11}$ 을 이용하여 구한다.

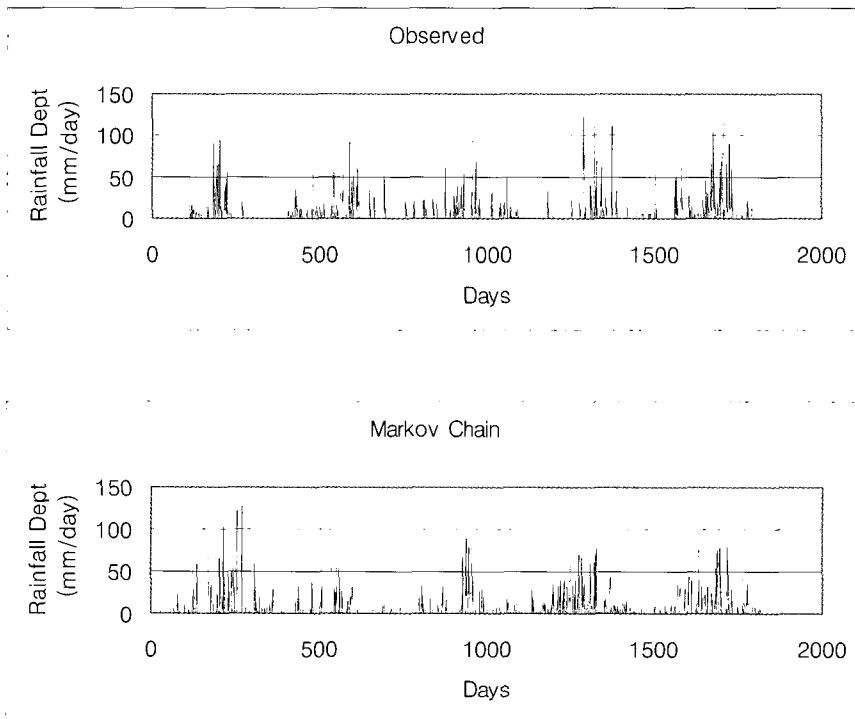


그림 4. 관측된 자료와 모의된 자료의 비교

#### 4.2.4 각 지점 일강우자료의 자기상관 및 공간상관 특성

금강유역 17개 지점자료의 자기상관 특성 및 공간상관 특성은 그림 2와 3과 같다. 그림 2에서 살펴볼 수 있는 것처럼 일강우자료의 자기상관계수는 매우 작다. 일일 지체의 경우도 그 값의 범위는 0.09 - 0.23정도

이며 평균적으로 약 0.15의 값을 갖는다. 따라서 일강우자료의 모의 발생에서 자기상관계수는 상대적으로 그 중요성이 작다고 판단할 수 있다.

공간상관의 경우는 전체적으로 거리의 증가에 따라 감소하는 경향을 띠고는 있으나 그 변동성이 매우 크게 나타나고 있어 어떠한 대표 곡선을 추정하더라도 유역의 공간적 변동성을 적절히 나타내기는 어렵다는

표 5. 모의치와 관측치 강우량의 기본 통계특성 비교

		평균	분산	상관계수			
				lag-1	lag-2	lag-3	lag-4
부강	관측치	2.97	120.13	0.18	0.07	0.04	0.07
	모의치	3.42	143.56	0.06	0.05	0.07	0.08
공주	관측치	3.28	151.27	0.16	0.05	0.04	0.07
	모의치	3.71	170.81	0.05	0.02	0.07	0.04
홍산	관측치	3.15	169.87	0.13	0.03	0.04	0.08
	모의치	3.53	205.29	0.04	0.04	0.05	0.05
무주	관측치	2.91	108.02	0.17	0.05	0.05	0.07
	모의치	3.17	111.48	0.05	0.05	0.06	0.06
장수	관측치	3.09	130.30	0.21	0.09	0.08	0.07
	모의치	2.95	117.33	0.05	0.04	0.05	0.05

표 6. 모의치와 관측치 강우량의 특성 비교 (1월)

특성치	지점				
	부강	공주	홍산	무주	장수
무강우일수					
관측치(표준편차)	28.23(5.90)	25.83(6.30)	26.40(5.97)	25.07(5.73)	26.07(5.72)
모의치(표준편차)	27.67(5.51)	25.13(5.07)	25.50(5.24)	24.83(4.96)	25.97(5.22)
강우일수					
관측치(표준편차)	2.77(2.76)	5.17(4.19)	4.60(3.52)	5.93(3.52)	4.93(3.17)
모의치(표준편차)	3.33(2.08)	5.87(2.26)	5.50(2.46)	6.17(2.17)	5.03(2.22)
무강우지속일수					
관측치(표준편차)	13.66(19.94)	7.98(9.69)	8.70(12.60)	6.21(7.89)	7.82(8.09)
모의치(표준편차)	9.98(10.99)	5.07(4.46)	5.72(5.27)	4.90(4.19)	6.12(6.08)
강우지속일수					
관측치(표준편차)	1.32(0.76)	1.60(1.05)	1.51(1.00)	1.46(0.86)	1.47(0.90)
모의치(표준편차)	1.20(0.55)	1.19(0.48)	1.25(0.66)	1.23(0.57)	1.19(0.51)
p00					
관측치	0.93	0.88	0.89	0.84	0.87
모의치	0.90	0.80	0.83	0.80	0.83
p11					
관측치	0.25	0.36	0.35	0.33	0.33
모의치	0.17	0.16	0.21	0.19	0.16

것을 판단할 수 있다. 아울러, 무강우자료가 공간상관에 미치는 영향을 파악하기 위해 유역 내 강우가 전혀 없었던 기간을 제외한 경우와 두 지점사이에 모두 강우가 관측된 경우에 대하여 공간상관을 추정하여 그림 3에 함께 도시하였다. 그림에서 살펴볼 수 있는 것은 세 경우 모두 전체적인 공간상관 특성은 유사하게 나타나고 있으나 유역 내 강우가 전혀 없었던 기간을 제외한 자료를 이용한 공간상관 특성은 전체자료를 이용한 공간상관보다 일관되게 작게 나타나고 있고 두 지점에 모두 강우가 관측된 자료를 이용한 경우의 결과는 위의 두 경우에 비해 공간적 변동성이 더 크게 나타나는 결과를 보여주고 있다.

### 5. 다지점 일강우 자료의 모의 발생 및 결과 분석

그림 4는 관측된 자료와 모의된 자료를 비교하여 나타낸 것이다. 이 그림에서 살펴볼 수 있듯이 모의된 일강우자료는 전체적으로 관측자료와 유사한 형태를 보이고 있음을 알 수 있다. 모의된 자료의 공간상관 특성은 모의 발생 시 대표지점 및 기타 지점사이의 순서를 그대로 유지하였기 때문에 원 자료의 특성을 그

대로 가지고 있다고 판단할 수 있으며 모의된 자료를 이용하여 공간상관을 조사해 본 결과에서도 원자료의 경우와 동일한 결과를 확인할 수 있었다.

그러나 자기상관의 경우는 원자료의 자기상관계수보다 훨씬 작은 값을 (평균적으로 0.08정도) 나타냄을 살펴볼 수 있다 (표 5). 이는 모의된 일강우자료가 원자료의 특성 중 일부를 적절히 나타내고 있지 못하다는 것을 나타내는데 그것은 표 6에서도 살펴볼 수 있다. 표 6에는 자기상관 계수 및 공간상관계수를 제외한 나머지 특성들을 정리한 것이다. 이 표에서 살펴볼 수 있는 것이 모의된 강우의 경우, 평균 무강우일수나 강우일수는 적절히 재현하고 있으나 평균 강우지속일수나 무강우지속일수는 원자료의 것보다 작게 나타나고 따라서 무강우-무강우 확률 및 강우-강우 확률도 또한 원자료보다 약간 작게 나타나고 있다. 이는 모의된 강우가 원자료의 군집특성을 완전히 재현하지는 못하고 있다는 것을 나타낸다. 이는 군집특성을 고려하는 포아송 모형의 경우에 군집특성이 과장되어 원 자료에 비해 무강우-무강우 확률 및 강우-강우 확률이 더 크게 나타나는 것과 대조를 이룬다 (Islam 등, 1990).

표 6. 모의치와 관측치 강우량의 특성 비교 (7월)

특성치	지 점				
	부 강	공 주	홍 산	무 주	장 수
무강우일수					
관측치(표준편차)	19.27(5.64)	17.93(5.46)	20.10(5.52)	17.63(5.50)	18.93(6.54)
모의치(표준편차)	18.40(4.98)	16.77(4.04)	18.47(4.57)	16.30(4.19)	18.07(4.21)
강우일수					
관측치(표준편차)	11.73(4.87)	13.07(4.96)	10.90(4.54)	13.37(5.07)	12.07(5.95)
모의치(표준편차)	12.60(4.32)	14.23(3.07)	12.53(3.81)	14.70(3.98)	12.93(3.50)
무강우지속일수					
관측치(표준편차)	3.34(3.20)	3.20(3.65)	3.72(4.08)	3.15(2.87)	3.68(4.85)
모의치(표준편차)	2.64(2.12)	2.10(1.41)	2.61(1.96)	2.14(1.43)	2.49(1.94)
강우지속일수					
관측치(표준편차)	2.03(1.56)	2.32(1.65)	2.01(1.57)	2.38(2.27)	2.37(1.86)
모의치(표준편차)	1.81(1.10)	1.79(1.23)	1.77(1.22)	1.93(1.22)	1.79(1.21)
p00					
관측치	0.70	0.69	0.73	0.69	0.73
모의치	0.62	0.52	0.62	0.53	0.60
p11					
관측치	0.52	0.58	0.51	0.59	0.58
모의치	0.45	0.44	0.44	0.49	0.44

## 6. 결 론

본 연구에서는 마코프 연쇄에 근거한 일강우의 다지점 모의 발생에 관해 살펴보았다. 강우의 발생은 대표 지점에 대해 1차 마코프 연쇄에 근거하여 간단히 모의 되도록 하였고 강우의 강도는 원자료의 강우사상 중에서 무작위하게 선택되도록 하였다. 지점간 공간상관은 강우강도의 결정 시 모든 지점에서 대표지점과 일관되게 선정되도록 함으로서 유지시킬 수 있었다. 모의된 자료는 원자료의 평균, 분산 및 평균 무강우일수나 강우일수를 잘 재현함을 살펴볼 수 있었으나 원자료의 군집특성(시간축에서의)은 어느 정도 완화되어 나타남을 살펴볼 수 있었다. 즉, 모의된 자료의 1일 지체 상관계수는 원자료의 그것보다 작게 나타나고 있으며 평균 강우지속일수 및 무강우지속일수, 강우-강우 확률 및 무강우-무강우 확률의 경우도 원자료의 그것보다 약간 작게 나타남을 파악할 수 있었다. 그러나 이러한 차이는 유역을 대표할 수 있는 지점을 적절히 선택함으로써 또한 대표지점의 강우발생 상태를 무강우-강우에서 좀더 세분화함으로써 어느 정도 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

한국수자원공사 (1992). 전국하천조사서.

- Eagleson, P.S., and Rodriguez-Iturbe, I. (1987). "Mathematical models of rainstorm events in space and time." *Water Resources Research*, Vol. 23, No. 1, pp. 181-190.
- Entekhabi, D., Rodriguez-Iturbe, I., and Eagleson, P.S. (1989). "Probabilistic representation of the temporal rainfall by a modified Neymann-Scott rectangular pulses model: Parameter estimation and validation." *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 2, pp. 295-302.
- Islam, S., Entekhabi, D., and Bras, R.L. (1990). "Parameter estimation and sensitivity analysis for the modified Bartlett-Lewis rectangular pulses model of rainfall." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No. D3, pp. 2093-2100.
- Katz, R.W. (1977). "Precipitation as a chain-dependent process." *Journal of Applied*

*Meteorology*, Vol. 16, pp. 671-676.

- Rodriguez-Iturbe, I., Gupta, V.K. and Waymire, E. (1984). Scale consideration in the modeling of temporal rainfall, *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 11, pp. 1611-1619.
- Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D.R.I., and Isham, V. (1987). "Some models for rainfall based on stochastic point processes." *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. A410, pp. 269-288.
- Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D.R.I., and Isham, V. (1988). "A point process model for rainfall: Further developments." *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. A417, pp. 283-298.
- Stern, R.D., and Coe, R. (1984). "A model fitting analysis of daily rainfall data." *Journal of the Royal Society of Statistical Analysis*, Vol. A147, pp. 1-34.
- Todorovic, P., and Woolhiser, D.A. (1975). "A stochastic model of n-day precipitation." *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 14, pp. 17-24.
- Valdes, J.B., Rodriguez-Iturbe, I., and Gupta, V. (1985). "Approximations of temporal rainfall from a multidimensional model." *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 8, pp. 1259-1270.
- Waymire, E., and Gupta, V.K. (1981). "The mathematical structure of rainfall representation 1. A review of the stochastic rainfall models." *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 5, pp. 1261-1272.
- Waymire, E., Gupta, V.K., and Rodriguez-Iturbe, I. (1984). "Spectral theory of rainfall intensity at the meso- $\beta$  scale." *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 10, pp. 1453-1465.
- Wilks, D.S. (1998). "Multisite generalization of a daily stochastic precipitation generation model." *Journal of Hydrology*, Vol. 210, pp. 178-191.
- (논문번호:99-074/접수:1999.09.10/심사완료:1999.11.27)