

비동질성 Markov 모형의 시간강수량 모의 발생을 이용한 IDF 곡선 및 홍수빈도곡선의 유도

Derivation of Intensity-Duration-Frequency and Flood Frequency Curve by
Simulation of Hourly Precipitation using Nonhomogeneous Markov Chain Model

최 병 규* / 문 영 일** / 오 태 석*** / 박 래 건****

Choi, Byung-Kyu / Moon, Young-Il / Oh, Tae Suk / Park, Rae Gun

Abstract

In this study, a nonhomogeneous markov model which is able to simulate hourly rainfall series is developed for estimating reliable hydrologic variables. The proposed approach is applied to simulate hourly rainfall series in Korea. The simulated rainfall is used to estimate the design rainfall and flood in the watershed, and compared to observations in terms of reproducing underlying distributions of the data to assure model's validation. The model shows that the simulated rainfall series reproduce a similar statistical attribute with observations, and especially maximum value is gradually increased as number of simulation increase. Therefore, with the proposed approach, the non-homogeneous markov model can be used to estimate variables for the purpose of design of hydraulic structures and analyze uncertainties associated with rainfall input in the hydrologic models.

keywords : Kernel density function, Markov model, Flood Frequency Curve, Hourly Precipitation simulation

요 지

본 연구에서는 비동질성 Markov 모형을 이용한 시간강수량의 모의발생을 수행하였다. 즉, 대상유역을 선정하고 시간강수량을 모의하여, 모의된 시간강수량을 이용한 확률강수량 및 확률홍수량을 산정하여 관측자료와 비교함으로써 비동질성 Markov 모형의 적용성을 평가하였다. 모의발생된 강수량자료와 관측강수량자료의 통계적 특성은 매우 유사한 것으로 나타났으며, 특히 모의년수가 증가할수록 극치값이 증가하는 경향을 나타냈다. 또한, 모의자료를 이용해 산정한 확률홍수량은 관측강수량을 이용해 산정한 결과보다 큰 재현기간에서 관측유입량 자료를 빈도해석하여 산정한 확률홍수량과 더 근사한 결과를 보였다. 따라서, 비동질성 Markov 모형을 이용하여 보다 신뢰성 있는 수공구조

* 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

The University of Seoul, Siripdae-gil 13(Jeonong-dong 90), Dongdaemun-gu, Seoul 130-743 Korea
(e-mail: bkchoi@samaneng.com)

** 교신저자 · 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 교수

The University of Seoul, Siripdae-gil 13(Jeonong-dong 90), Dongdaemun-gu, Seoul 130-743 Korea
(e-mail: ymoon@uos.ac.kr)

*** 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

The University of Seoul, Siripdae-gil 13(Jeonong-dong 90), Dongdaemun-gu, Seoul 130-743 Korea
(e-mail: waterboy@uos.ac.kr)

**** (주) 삼안 수력부 대리

Saman Corporation, 1-20, Beyolyang-dong, Gwacheon-si, Gyeonggi-do 427-707 Korea
(e-mail: rkpark@samaneng.com)

물의 설계수문량 산정 등에 많이 활용될 수 있을 것으로 판단되며 수자원 개발시 불확실성 분석을 위한 입력 자료인 강수량자료로도 활용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 핵밀도함수, 마코프 모형, 홍수빈도곡선, 시간강수량 모의

1. 서론

수공구조물의 설계에 있어 극치수문량에 대한 추정是最重要하면서도 어려운 문제이다. 특히, 수자원개발 시에 계획, 설계, 운영 및 관리에 있어 기준이 되는 수문량은 주로 재현기간에 따른 침투홍수량에 의해 결정되므로, 합리적인 설계홍수량의 결정은 매우 중요하다. 그러나 현재 우리나라 대부분의 유역에서 관측된 유량 자료는 매우 제한적이며, 계측유역의 관측자료도 매우 부족한 실정이다. 그러므로 대부분의 설계홍수량 산정 기법은 유출량에 비해 상대적으로 자료가 풍부한 강우빈도해석을 통해 설계강수량을 결정하고 이를 활용하여 홍수량으로 산정하고 있다. 따라서 관측된 강수량 자료를 모집단으로 가정하고 설계강수량을 채택하는 과정은 수문학의 가장 기본적인 중요한 단계라고 할 수 있다.

일반적으로 설계홍수량 산정을 위한 빈도해석시에 필요한 관측연수는 Flood Estimation Handbook (Institute of Hydrology, 1999)에 따르면 구하려는 재현기간(T)보다 대상지점의 자료기간이 두 배($2T$) 이상일 때, 지점빈도해석을 통해 설계홍수량을 결정할 것을 추천하고 있다. 그러나 우리나라의 주요한 하천과 댐 등의 주요 수공구조물의 설계빈도는 재현기간 50년 이상의 설계수문량을 기준으로 하고 있으나 관측자료는 이에 크게 부족한 실정이다.

따라서 이러한 문제점을 극복하기 위한 방법으로 수문통계학 분야에서 시도되고 있는 짧은 관측기간의 수문자료를 연장하기 위한 MCS(Monte Carlo Simulation) 등의 통계적 기법을 활용하여 시간강수량 자료를 확충하고 있으나, 이는 관측 수문자료에서 극치값만을 모의하기 때문에 관측자료가 가지고 있는 시계열을 반영하기가 어려운 문제점이 있다.

수문시계열 자료 중에서 강수량 자료를 모의하기 위한 추계학적 모형으로는 Markov 연쇄 모형과 Alternating Renewal Process, Poisson process 등이 있다. Poisson process에 근거한 강수량 모의발생 모형은 Rodriguez-Iturbe *et al.*(1984), Rodriguez-Iturbe *et al.*(1987; 1988), Entekhabi *et al.*(1989), Islam *et al.*(1990)에 의해 연구되었으며, 모형들의 일반적인 구조에서 강수량의 발생은 Poisson process를 따르고, 강우강도와 지속기간은 일반

적으로 지수분포를 따른다고 가정하는 것이다. 또한 강수량의 군집특성을 나타내기 위해 보통 Neyman-Scott 과정 등을 이용한다. 이재준과 이정식(2002)은 시간강수량 계열의 군집성을 고려한 Point 과정의 추계학적 모형인 Neyman-Scott형의 군집 과정을 이용하여 강수량의 군집성을 고려할 수 있는 강수량발생과정을 모형화하였다.

Markov 연쇄(Todorovic and Woolhiser, 1975; Katz, 1977; Waymire and Gupta, 1981; Stern and Coe, 1984; Wilks, 1998)에 근거한 모형은 강수량과 무강수량 사이의 천이확률(transition probability)에 근거하여 강수량의 발생 유무를 결정하는 것을 기초로 하는 모형으로 강수량의 모의발생이 상대적으로 쉽고 그 확률의 추정도 과거 자료의 분석을 통해 상대적으로 쉽게 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 순차적 모의가 가능하기 때문에 Poisson process에 근거한 모형과 같이 주어진 시간단위로 모의 결과를 재구성해야 하는 번거로움이 없으며 천이확률에 따라 강수량, 무강수량이 결정되기 때문에 강수량의 군집특성을 고려해 주는 과정이 없는 것이 일반적이다. Richardson(1981)은 일강수량을 1차 Markov 연쇄-지수분포 모형으로 먼저 결정하였다. 이원환과 이재준(1985)은 2변량 모형을 이용하여 건조기간과 습윤기간의 단일지점에 대하여 일강수량을 모의하였으며, 한국수자원공사(1999)에서는 Markov 연쇄이론을 이용해 강수량을 모의하여 강수량을 확충한 후 이를 강우-유출모형에 이용하였다. 문영일과 차영일(2004) 문영일 등(2004)은 비동질성 Markov 모형을 통해 일강수량을 모의발생하였다.

Bruhn *et al.*(1980)은 식물의 병해관리에 대한 일기상자료를 제공하기 위한 모의발생 모형을 개발하였고, 강경석(2000)은 자료의 유역 내 각 지점의 공간적 특성을 고려하여 강수량을 모의 발생하기도 하였다. 또한, 이창훈과 김승(1995)은 주성분 분석과 회귀분석을 이용하여 계절적인 특성이 고려된 월강수량 자료로부터 결측치를 보완하여 년 및 월평균 강수량을 추정하였다. 강태호 등(1999)은 장래 유출 및 수질 모의 예측을 위해 장래 입력강수량을 시간강수량에 의한 시계열 모형으로 구축하였다. 이와 같은 기존의 연구는 일강수량의 모의에 중점을 두어 수행하고 있으나, 시간강수량의 모의에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 대상유역을 선정하여 비동질성 Markov 모형을 통해 시간강수량을 모의발생하였다. 모의한 시간강수량 자료를 통해 대상 유역의 IDF곡선을 유도하고, 강우-유출모형을 이용하여 홍수량으로 환산하여 홍수빈도곡선을 유도하였다.

2. 비동질성 Markov 연쇄 모형

본 연구에서는 대상유역의 IDF곡선 및 홍수빈도곡선의 유도를 위해 핵밀도함수를 이용한 비동질성 Markov 모형을 통한 시간강수량 자료의 모의를 수행하였다. 비동질 Markov 모형은 크게 두가지 부분으로 구분된다. 첫 번째는 천이확률을 이용하여 습윤시간을 결정하는 것이며, 두 번째는 습윤시간의 강수량을 변동핵밀도함수를 이용해 결정하는 것이다. 다음 Fig. 1은 비동질성 Markov 모형을 이용하여 시간강수량을 모의하는 절차이다.

2.1 천이확률을 이용한 습윤시간의 결정

비동질성 Markov 모형의 구성을 위해 One-Step의 2×2 천이확률 행렬을 핵밀도함수를 적용하여 산정하였다. 1년 중에 첫 번째 시간부터 마지막 시간까지의 시간 강수량을 다음의 4가지 종류로 구분하였다. 첫 번째는 $t_{w_1}, t_{w_2}, \dots, t_{w_{n_w}}$ 는 n_w 개의 강수시간 사상, 두 번째는 시간 지수 $t_{d_1}, t_{d_2}, \dots, t_{d_{n_d}}$ 는 n_d 개의 무강수시간 사상, 세 번째는 $t_{wd_1}, t_{wd_2}, \dots, t_{wd_{n_{wd}}}$ 는 강수시간 사상에서 무강수시간 사상으로 바뀌는 n_{wd} 개의 천이발생 시간, 마지막으로 $t_{dw_1}, t_{dw_2}, \dots, t_{dw_{n_{dw}}}$ 는 무강수시간 사상에서 강수시간 사상으로 바뀌는 n_{dw} 개의 천이발생 시간으로 구분하였다. 여기서, 1년 중에 가장 마지막 시간은 그 다음 연도의 첫 번째 시간과 연속되는 것으로 천이확률을 구성하게 된다.

t 시간의 천이확률 $P_{wd}(t)$ 와 $P_{dw}(t)$ 는 비매개변수

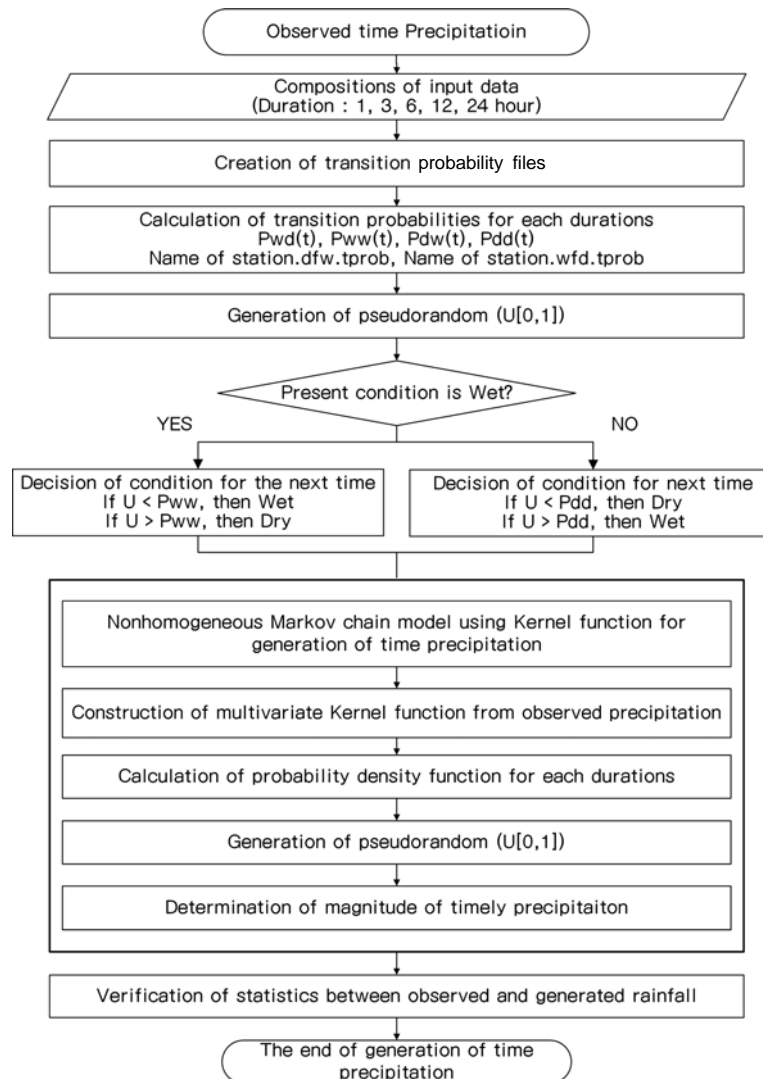


Fig. 1. Diagram of Nonhomogeneous Markov Chain Model

적 핵밀도함수 추정치를 이용하여 자료로부터 구한다. $P_{wd}(t)$ 는 t_{wd_1}, t_{wd_2} 등의 강수시간사상에서 $t_{wd_1} + 1, t_{wd_2} + 1$ 등의 무강수시간사상으로 천이되는 것을 뜻하며, $P_{dw}(t)$ 는 t_{dw_1}, t_{dw_2} 등의 무강수시간사상에서 $t_{dw_1} + 1, t_{dw_2} + 1$ 등의 강수시간사상으로 천이되는 것을 의미한다.

각각의 강수상태에서 무강수상태로의 천이확률과 무강수상태에서 강수상태로의 천이확률은 다음의 Eqs. (1)~(4)를 통해 산정하게 된다.

$$\hat{P}_{dw}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{ndw} K\left(\frac{t-t_{dwi}}{h_{dw}}\right)}{\sum_{i=1}^{nd} K\left(\frac{t-t_{di}}{h_{dw}}\right)} \quad (1)$$

$$\hat{P}_{wd}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{nwd} K\left(\frac{t-t_{wdi}}{h_{wd}}\right)}{\sum_{i=1}^{nw} K\left(\frac{t-t_{wi}}{h_{wd}}\right)} \quad (2)$$

$$P_{wd}(t) + P_{ww}(t) = 1 \quad (3)$$

$$P_{dw}(t) + P_{dd}(t) = 1 \quad (4)$$

여기서, h_{wd} 와 h_{dw} 는 각각 강수시간에서 무강수시간으로, 무강수시간에서 강수시간으로 천이될 때의 광역폭이고, $t_{wi}, t_{di}, t_{wdi}, t_{dwi}$ 는 각각 i 번째 강수시간, 무강수시간, 강수시간에서 무강수시간, 무강수시간에서 강수시간으로 천이되는 시간을 말하고, P 는 추정된 확률값을 의미한다. 또한, nwd 는 관측자료에서 강수시간에서 무강수시간으로 천이 되는 사상수, ndw 는 무강수시간 사상에서 강수시간 사상으로 천이 되는 사상수, nd 는 관측자료에서 무강수시간 수, nw 는 강수시간 수, $K(\cdot)$ 는 핵함수, $h(\cdot)$ 는 광역폭, t 는 구하고자 하는 시간이고, $t(\cdot)$ 는 위에서 설명한 것과 마찬가지로 ()안의 것이 발생한 시간이다. 이와 같이, 천이확률이 구성되면 각 시간별로 난수를 발생시켜 현재상태에 따른 조건부 천이 확률로부터 다음 시간의 상태를 결정하게 된다.

2.2 강수량의 크기 결정

시간강수량의 모의과정에서 강수시간이 결정되면 다음으로 발생하는 강수량의 크기를 산정하여야 한다. 시간강수량의 크기를 결정하기 위해서 첫 번째로 강수가 발생한 시간의 광역폭(h_p)을 결정하여, 선정된 광역폭

에서 관측된 시간강수량 자료들의 핵밀도함수로부터 강수량의 크기를 모의발생시키게 된다.

따라서 무강수시간을 제외한 강수시간에서는 LSCV 기법(Rajagopalan et al., 1996)을 통해 광역폭을 선정하게 된다. LSCV 기법은 Rudemo(1982)와 Bowman(1984)에 의해 제안된 방법으로 Eq. (5)에 나타난 광역폭 h 에 걸친 M_0 를 최소화하는 것으로, M_0 의 값은 전적으로 관측 자료에 의존하는 것으로 알려져 있다.

$$M_0(h) = \int \hat{f}^2 - 2n^{-1} \sum_i \hat{f}_{-i}(X_i) \quad (5)$$

여기서, f 는 임의의 확률밀도함수를 의미하며, 이에 대한 추정치를 \hat{f} 라고 한다. LSCV의 기본원리는 자료로부터 주어진 h 의 구간에 대하여 $R(\hat{f})$ 를 최소화시키는 \hat{f} 를 구하는 것이다.

선정된 광역폭에 포함되어 있는 강수사상에 핵함수를 통해 확률밀도함수를 추정하고 추정된 밀도함수에 난수를 대응시켜 강수량의 크기를 결정하게 된다. 즉, 습윤시간 t 에서 강수량은 Eq. (6)의 조건부확률밀도함수에 난수를 대응시킨다.

$$\hat{f}(y | t) = \frac{\frac{1}{yh_{LY}} \sum_{i=1}^{np} K_c\left(\frac{\log(y) - \log(y_i)}{h_{LY}}\right) \cdot K\left(\frac{t-t_i}{h_p}\right)}{\sum_{i=1}^{np} K\left(\frac{t-t_i}{h_p}\right)} \quad (6)$$

여기서,

$\hat{f}(y) = \frac{1}{np} \sum_{i=1}^{np} \frac{1}{h_{LY} y} K_c\left(\frac{\log(y) - \log(y_i)}{h_{LY}}\right)$ 가 된다. 또한, 난수 $U[0, 1]$ 는 핵함수 $K_c(\cdot)$ 에 대응하는 값이므로 모의발생된 강수량은 $y^* = \exp[\log(y_i) + Uh_{LY}]$ 이다. 이때 y_i 는 교란을 목적으로 선택한 과거 관측치의 강수량이며, h_{LY} 는 대수화된 자료의 광역폭(Bandwidth)이다.

3. 대상유역의 선정

비동질성 Markov 모형을 통해 시간강수량을 모의발생하여 IDF 곡선 및 홍수빈도곡선을 유도하기 위하여 강수량 및 유입량의 관측이 비교적 잘 이루어진 안동댐 유역을 대상유역으로 선정하였다. 안동댐 유역에는 기상청에서 관할하는 안동, 봉화 및 태백 강수관측소가 존재하고 있다. 따라서 안동, 봉화 및 태백의 Thiessen 면적 계수를 산정한 후에 각각의 지점에서 관측된 한시간 단위의 시간강수량 자료들을 이용해 면적평균한 한

시간 단위의 시간강수량 계열을 구성하였다. Fig. 2는 안동댐 유역의 Thiessen망도이다.

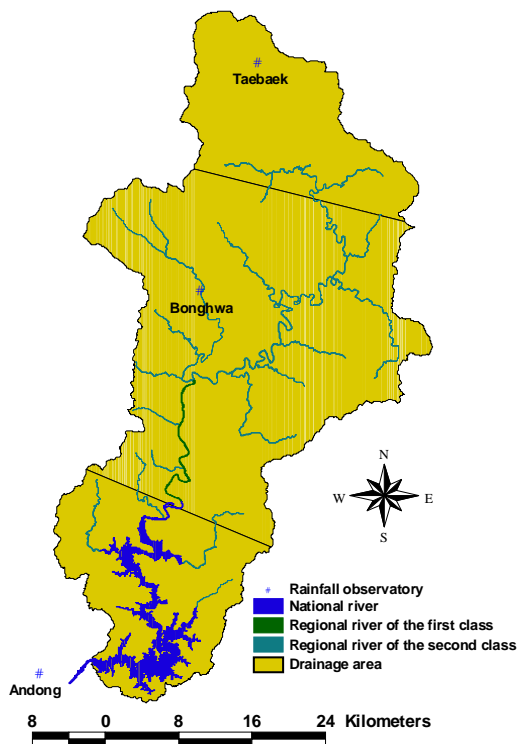


Fig. 2. Thiessen of Andong Dam

관측강수량을 이용한 IDF곡선의 유도는 안동, 봉화 및 태백 지점의 관측자료를 각각 빈도해석하여 면적평균한 확률강수량을 이용하였으며, 비동질성 Markov 모형을 통한 시간강수량의 모의는 원자료를 면적평균한 시계열 자료를 모의하여 IDF곡선을 유도해 비교하였다.

4. 비동질성 Markov 모형을 이용한 시간강수량의 모의발생

강수량을 모의하기 위한 기준 자료는 안동댐 유역의 기상청 관할 안동, 봉화, 태백관측소의 시간강수량을 안동댐 유역 Thiessen 면적비를 적용한 면적평균 시간강수량을 이용하였고 자료의 크기는 전기간에 대하여 시간강수 자료가 확보된 1988년 1월 1일부터 2006년 12월 31일까지의 시간강수 자료를 사용하였다.

비동질성 Markov 모형에 의해 시간강수량을 모의발생하기 위하여 면적평균 시간강수량 자료를 1, 3, 6, 12, 24시간의 시간강수량으로 변환하여 입력하였다. 따라서 1시간단위의 시간강수량은 1년 동안 총 8,760개의 관측자료가 존재하며, 24시간 단위의 시간강수량은 1년 동안 365개의 관측자료가 존재하게 된다. 천이확률의 계산을 위한 변동폭의 설정은 1, 3, 6, 12, 24시간 순으로

240, 80, 40, 20, 10 단위시간을 광역폭으로 설정하였다. 이는 지속시간이 짧을수록 관측자료에서 보이는 무강수의 단위시간들이 길어지기 때문에 강수 발생의 불확실성을 모형에 감안하기 위해 강수 단위시간이 짧을수록 초기변동폭을 크게 설정해주었다. 변동폭의 초기값을 설정하는 이유는 모형에서 LSCV기법을 통해 최적의 광역폭을 결정하게 되는데 이 값이 너무 작게 추정되면 관측된 습윤시간의 변동폭이 좁게 되어 실측강수가 발생하지 않은 시간에서의 모의강수가 발생할 수 있는 천이확률이 영(zero)에 근사하게 되기 때문이다. 따라서 실제로 강수가 발생하지 않은 시간도 강수가 발생한 시간 근처에 위치하고 있다면, 강수가 발생할 수 있는 천이확률을 갖게 하기 위해서 초기변동폭을 설정하게 된다. 또한, 단위시간이 짧을수록 발생한 강수 사상 사이의 거리가 멀기 때문에 변동폭을 보다 크게 설정할 필요성이 있다.

비동질성 Markov 모형을 통해 모의된 시간강수량의 통계적 특성을 관측자료의 통계적 특성과 비교 분석하였다. 관측자료와 모의자료의 특성을 분석하기 위하여 (i) 관측자료와 모의된 강수량의 전기간과 (ii) 습윤시간에 대한 여러 통계값(①평균값 ②표준편차 ③최소값 ④1사분위 값(25% quantile) ⑤중간값 ⑥3사분위 값(75% quantile) ⑦최대값)을 비교 분석하였다. 모의기간은 50, 100, 200년으로 하였으며 각각에 대하여 강수량의 분위값 및 최대값, 최소값 등을 비교 분석하였다.

Table 1에 나타난 바와 같이 전체 시간강수량의 평균값을 비교한 결과에서 모의강수량의 평균이 관측값보다 약간 크게 산정되었는데 이는 모의 기간이 길어지면서 관측된 자료보다 모의 결과에서 극치값이 보다 크게 발생하였기 때문이다. 즉, 모의기간이 길어질수록 최대값이 약간씩 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 최소값과 1사분위값, 중앙값 및 3사분위값은 대부분 영(zero)을 갖는 것으로 나타났다. 24시간의 경우에서만 3사분위값이 관측자료에서는 0.7, 모의자료에서는 모의년수가 50, 100, 200년에서 1.2, 1.3, 1.2의 값을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 Table 1에서는 모의년수에 따른 최대값만을 수록하였으며, 이는 전체 시간강수량의 단위시간별 강수량이 발생하지 않은 사상이 강수량이 발생한 사상보다 훨씬 더 많기 때문에 나타난 결과이다. 따라서 관측강수량과 모의강수량의 평균과 표준편차 등의 통계량을 비교 분석한 결과에서 나타난 바와 같이 모의된 강수량이 관측강수량이 갖는 통계적 특성을 잘 반영하고 있는 것으로 사료된다.

Table 2에 나타난 결과는 강수가 발생한 습윤시간의 강수량 자료를 대상으로 관측자료와 모의자료의 통계적

Table 1. Comparison of Statistics for Rainfall of All Events between Observed and Generated Data

Classification		Average	Standard Dev.	Maximum
Observed data		0.1407	0.8926	36.80
Generated data of 1 hour	50 years	0.1611	0.9848	36.58
	100 years	0.1629	0.9776	38.26
	200 years	0.1616	0.9764	38.35
Observed data		0.4220	2.2566	82.10
Generated data of 3 hour	50 years	0.4036	2.1447	82.95
	100 years	0.4146	2.1693	88.25
	200 years	0.4156	2.1990	89.58
Observed data		0.8440	4.0150	96.20
Generated data of 6 hour	50 years	0.9007	4.1014	99.74
	100 years	0.8947	4.0876	104.90
	200 years	0.8739	4.0081	108.74
Observed data		1.6881	7.0955	174.80
Generated data of 12 hour	50 years	1.9852	7.6151	179.48
	100 years	1.9726	7.5257	193.71
	200 years	1.9702	7.5440	204.66
Observed data		3.3762	11.5992	192.10
Generated data of 24 hour	50 years	3.7714	11.8835	209.82
	100 years	3.8122	11.9568	238.00
	200 years	3.7728	12.0599	242.95

Table 2. Comparison of Statistics for Rainfall of Wet Events between Observed and Generated Data

Classification		Ave.	St. Dev.	Min.	25%	Median	75%	Max.
Observed data		1.5580	2.5750	0.00	0.20	0.60	1.80	36.80
1 hour	50 years	2.1893	2.9449	0.00	0.30	1.10	2.89	36.58
	100 years	2.2045	2.9605	0.00	0.30	1.12	2.90	38.26
	200 years	2.2036	2.9702	0.00	0.30	1.11	2.90	38.35
Observed data		2.9042	5.2711	0.10	0.30	0.80	3.10	82.10
3 hour	50 years	2.7787	4.9931	0.00	0.26	0.80	3.03	82.95
	100 years	2.8496	5.0677	0.00	0.26	0.81	3.12	88.25
	200 years	2.8636	5.0870	0.00	0.27	0.81	3.13	89.58
Observed data		4.4802	8.3221	0.10	0.30	1.20	4.60	96.20
6 hour	50 years	4.8111	8.4446	0.00	0.37	1.29	5.22	99.74
	100 years	4.8031	8.4353	0.00	0.36	1.29	5.21	104.90
	200 years	4.6651	8.1891	0.00	0.36	1.28	5.02	108.74
Observed data		6.7358	12.9171	0.10	0.40	1.70	7.10	174.80
12 hour	50 years	9.7461	14.4514	0.00	1.85	4.51	10.98	179.48
	100 years	9.6718	14.2410	0.00	1.86	4.50	11.02	193.71
	200 years	9.6327	14.2825	0.00	1.87	4.51	10.91	204.66
Observed data		9.5372	17.9283	0.10	0.50	2.40	10.70	192.10
24 hour	50 years	12.9057	19.1141	0.00	2.20	5.81	14.44	209.82
	100 years	12.8996	19.1477	0.00	2.21	5.85	14.75	238.00
	200 years	12.9206	19.5058	0.00	2.19	5.82	14.84	242.95

특성을 비교한 것이다. 지속시간 1, 3, 6시간에서는 관측강수량과 모의강수량의 크기의 차이가 그리 크지 않

으나 지속시간 12, 24시간에서는 모의강수량의 평균이 관측강수량 것보다 더 크게 산정되었다. 이는 앞에서

언급한 것과 마찬가지로 각 모의 결과에서 최대값이 증가하는 극치 사상이 나타나기 때문인 것으로 사료 된다. 또한, 습윤시간의 최소값이 영(zero)으로 표기되는 경우가 Table 2에서 나타났는데, 이는 보다 정확한 습윤시간의 통계 결과를 추출하기 위해서 유효 숫자를 소수점 이하 네자리(0.0001)에서 유효한 양수(+)가 나타났을 경우에 강수가 발생한 것으로 보고 습윤시간의 통계량 산정 결과에 반영해 주었기 때문이다.

습윤시간의 발생비율을 전체시간을 대상으로 비교한 결과를 살펴보면, 관측강수량 자료에서는 지속시간 1, 3, 6, 12, 24시간에 따라 9.03%, 14.53%, 18.84%, 25.06%, 35.40%이며, 모의강수량 자료 중에서 200년간 모의한 결과에서는 습윤시간의 비율이 지속시간 1, 3, 6, 12, 24시간에 따라 9.04%, 14.08%, 18.25%, 25.24%, 34.12%의 값을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 비동질성 Markov 모형에 의해 모의된 자료는 원자료의 습윤시간을 잘 반영하는 것으로 보여진다.

또한, 각 연도별로 관측 및 모의된 자료의 연최대치 강수량자료를 구성하여 비교하였다. 모의자료는 200년 모의된 자료를 이용하였다. Table 3에 나타난 바와 같이, 지속시간 1, 3, 6, 12, 24시간에서 관측자료와 모의자료의 연최대 시간강수량 평균값 차이는 약 5.5%,

0.8%, 0.2%, 1.6%, -0.8%의 차이를 갖는 것으로 나타났다. 이는 연최대 시간강수량의 모의 결과가 관측자료와 거의 유사한 통계적 특성을 반영해 주고 있는 것으로 판단된다.

또한, 관측자료와 모의자료의 연강수량을 추출하여 비교하였다. 관측된 자료와 비교하였을 때에 모의된 연강수량의 편차가 관측자료보다 약간 더 크게 나타났다. 따라서 모의값과 관측값의 연강수량 분석 결과에서는 모의된 결과가 관측값에 비해 약간 더 커지는 것으로 나타났으나 관측값과 많은 차이를 보이는 것은 아닌 것으로 판단된다.

즉, 관측한 강수량의 연강수량은 1232.3mm이며, Table 4에 나타낸 바와 같이 지속시간별로 모의된 연강수량의 평균은 1388.6mm, 1210.1mm, 1267.6mm, 1348.0mm, 1275.8mm로 관측 자료와 12.7%, -1.8%, 2.9%, 9.4%, 3.5%의 차이를 보이고 있다.

마지막으로, 관측 자료와 지속시간별로 200년 모의된 자료로부터 월강수량을 추출하였다. 추출된 월강수량 자료를 이용하여 월평균 강수량을 산정하여 비교하였다. Fig. 3에서 나타난 바와 같이, 관측자료와 모의자료의 월평균 강수량은 비슷한 값을 갖는 것으로 나타났다.

Table 3. Comparison of Annual Maximum Precipitation for Each Duration between Observed and Generated Data

annual maximum precipitation for each duration(mm)										
Duration	1 hour		3 hour		6 hour		12 hour		24 hour	
	Obs.	Gen.	Obs.	Gen.	Obs.	Gen.	Obs.	Gen.	Obs.	Gen.
Average	27.1	28.6	48.0	48.4	67.3	67.5	109.4	111.1	138.9	137.8
St. Dev.	6.7	6.4	15.9	16.1	22.4	20.3	40.1	33.1	40.5	48.5
Min.	18.9	17.2	28.8	26.8	41.5	37.6	59.3	51.6	72.8	62.1
25%	21.8	23.3	37.4	35.2	52.9	49.2	85.2	91.7	107.9	101.3
Median	25.0	28.3	42.3	44.0	58.3	63.4	93.9	113.8	137.3	132.4
75%	31.7	32.9	54.8	59.0	76.9	82.3	127.1	129.8	168.5	154.7
Max.	41.5	43.3	92.9	101.4	109.3	123.5	200.0	234.1	223.0	282.1

Table 4. Comparison of Yearly Precipitation between Observed and Generated Data

Classification	Observed data (mm)	Generated yearly precipitaion for each duration(mm)				
		1 hour	3 hour	6 hour	12 hour	24 hour
Average	1232.3	1388.6	1210.1	1267.6	1348.0	1275.8
St. Dev.	259.4	236.3	182.6	193.9	218.1	234.0
Min.	873.6	909.2	707.4	852.1	869.4	720.8
25%	1000.8	1196.1	1086.5	1135.6	1181.0	1130.9
Median	1281.6	1409.7	1184.4	1263.5	1340.0	1271.8
75%	1374.3	1563.4	1321.2	1396.3	1519.6	1384.5
Max.	1704.7	1890.5	1689.8	1746.4	1977.0	1881.8

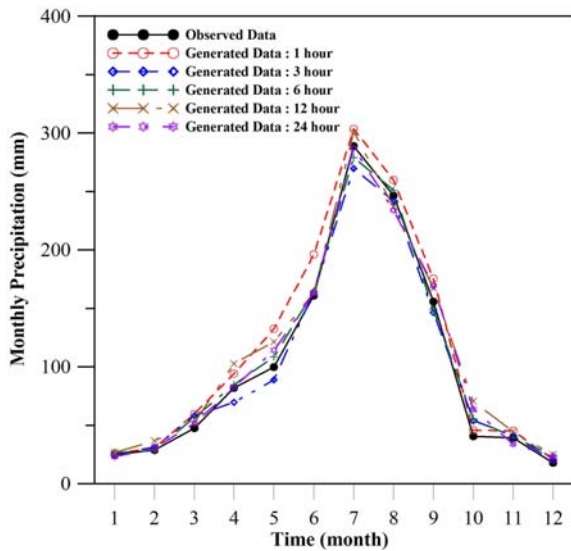


Fig. 3. Comparison of Monthly Average Precipitation

5. 모의 시간강수량의 적용

관측된 시간강수량과 모의된 시간강수량을 비교하기 위해 각 지속시간별(1, 3, 6, 12, 24시간)로 빈도해석을 통해 IDF 곡선을 유도하여 비교하였다. 또한, 안동댐 유역에서 관측된 홍수량을 빈도해석한 결과와 모의된 200년자료를 활용해 강우-유출 모형을 통해 유도된 홍수빈도곡선을 비교하였다.

5.1 확률강수량의 산정 및 IDF 곡선의 유도

안동, 태백 및 봉화지점에서 관측된 시간강수량 자료에서 지속시간 1, 3, 6, 12, 24시간 연최대 시간강수량 계열을 구성하였다. 각 지속시간별 연최대강수량은 Markov 모형을 통해 모의된 시간강수량의 입력자료와 일관성을 유지하기 위해서 1988년부터 2006년까지의 자료를 이용하였다.

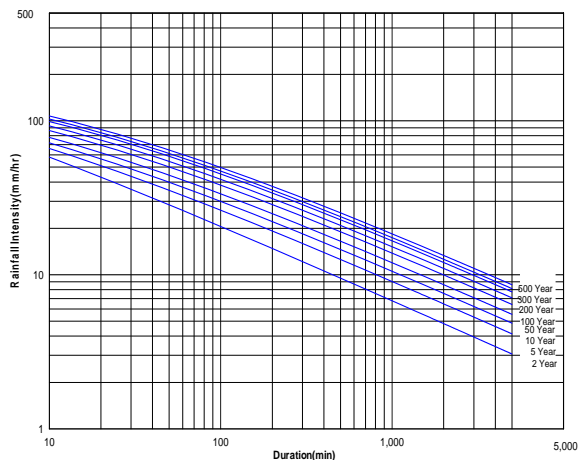


Fig. 4. IDF Curve using Observed Data

따라서 관측 및 모의 자료 중에서 연최대치를 추출하여 빈도해석을 수행하였다. 빈도해석하기 위해 사용된 확률분포형은 Gamma 2변수 및 3변수, GEV, Gumbel, Log-Gumbel 2변수 및 3변수, Log-Normal 2변수 및 3변수, Log-Pearson Type III, Weibull 2변수 및 3변수, Wakeby 4변수 및 5변수의 총 13개 분포형을 적용하였다. 매개변수 추정방법은 모멘트법(method of moments), 최우도법(method of maximum likelihood) 그리고 확률가중모멘트법(method of probability weighted moments)을 적용하였다. 검정방법으로는 χ^2 검정, K-S(Kolmogorov-Smirnov) 검정, CVM(Cramer Von Mises) 검정, PPCC(probability plot correlation coefficient) 검정이 있으며 본 연구에서는 4가지 방법을 모두 적용하였다.

관측 및 모의자료의 지속시간별 연최대시간강수량에 임의시간 환산계수를 적용하여 확률가중모멘트법으로 매개변수를 추정하여 적합도 검정 결과를 비교한 결과에서 Gumbel 분포형이 최적분포형으로 선정되었다.

지속시간별 재현기간별로 산정된 확률강수량을 이용하여 강우강도식을 유도하고 빈도별 결정계수가 가장 크고 편차가 가장 작게 산정된 Japanese형 ($I(t) = a/(\sqrt{t} + b)$)으로 안동댐 유역의 IDF곡선을 작성하였다.

Figs. 4 and 5에서 관측강수량과 모의강수량을 대상으로 지속시간별 및 재현기간별로 확률강수량을 산정하고 IDF 곡선을 각각 작성하였다. 지속시간별로 구분하여 결과를 비교하여 보면 3시간에서는 모의강수량과 관측강수량을 이용한 값이 거의 같게 산정되었으며 1시간과 24시간에서는 모의강수량을 이용한 값이 약간 크게 산정된 반면 6시간과 12시간에서는 관측강수량을 이용한 값이 약간 크게 산정되었다. 지속시간 24시간은 관

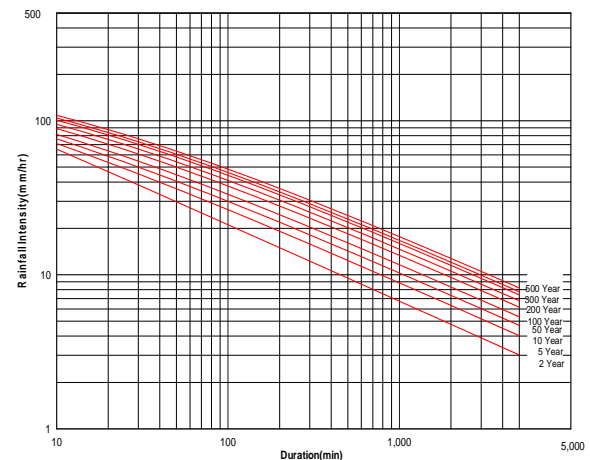


Fig. 5. IDF Curve using Generated Data

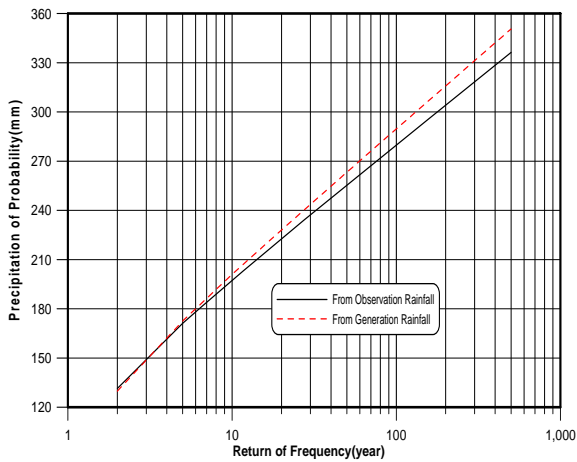


Fig. 6. Comparison of Probability Precipitation for 24 Hours

측자료를 이용한 확률강수량과 모의자료를 이용한 확률 강수량을 비교한 결과에서 2년 빈도를 제외한 나머지 빈도에서 모의강수량에 의한 값이 관측강수량보다 0.80 ~4.25%정도 크게 산정되었다.

Fig. 6은 지속시간 24시간의 관측 및 모의자료를 이용해 빈도해석하여 산정한 확률강수량을 비교한 결과로써 모의자료를 이용하여 산정한 확률강수량이 관측자료를 이용하여 산정한 확률강수량보다 약간 더 크게 산정되었다. Fig. 7은 재현기간 200년의 확률강수량을 지속 시간별로 비교하여 도시한 결과이다. 지속시간이 짧으면 관측강수량에 의한 확률강수량과 모의강수량에 의한 것이 거의 같아지는 경향을 보이고 있는 반면 지속시간이 길어질수록 모의 강수량을 이용한 강우강도의 값이 커지는 것을 알 수 있다.

5.2 비동질성 Markov 모델을 이용한 홍수빈도곡선의 유도

안동댐 지점에서 관측된 홍수량 자료를 이용하여 연

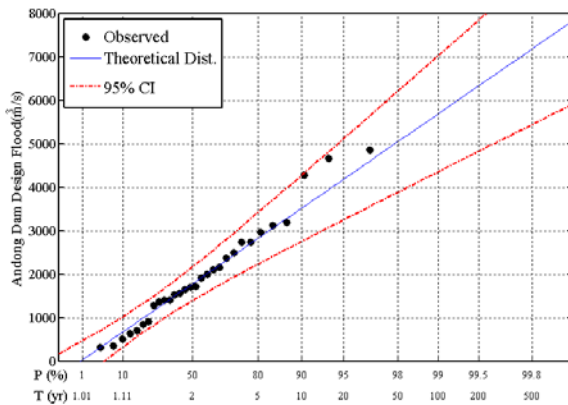


Fig. 8. Illustration of Discharge using Gumbel Probability Paper

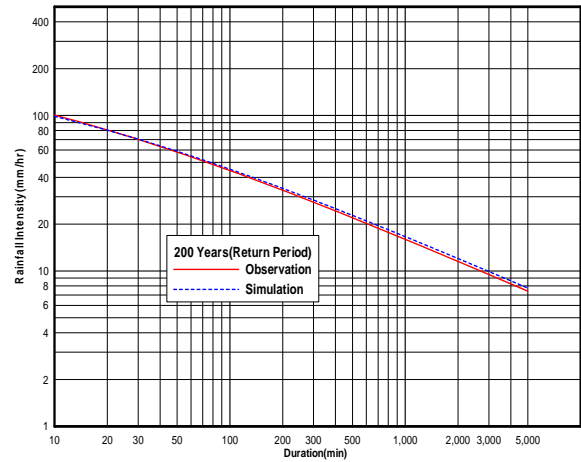


Fig. 7. Comparison of Probability Precipitation for 200 Years-return Period

최대홍수량 계열을 구성하고 빈도해석을 수행하였다. 또한, 최적화 한 강우-유출 모형을 통해 관측된 시간강수량과 모의된 시간강수량으로 산정한 확률강수량을 통해 확률홍수량을 추정하여 비교·분석하였다.

5.2.1 안동댐 유입량 자료의 빈도해석을 통한 확률홍수량 산정

안동댐 지점에서 관측된 댐유입량 자료를 이용하여 연최대홍수량계열(한국수자원공사, 2005; 국가수자원관리종합정보홈페이지)을 추출하였다. 추출된 연최대홍수량을 이용해 빈도해석을 수행하였으며, 빈도해석의 절차는 앞에서 제시한 강수의 빈도해석과 동일한 절차를 통해 수행하였으며 Gumbel 분포형이 최적분포형으로 선정되었다.

5.2.2 강우-유출 모형을 이용한 확률홍수량 산정

본 연구에서는 비동질성 Markov 모델을 통해 시간강수량을 모의발생하였다. 모의된 시간강수량의 적절성을 평가하기 위하여 안동댐 유역을 대상으로 강우-유출

Table 5. Flood Quantiles(m^3/s)

Return period(yr)	Probability discharge
2	1,793.9
5	2,885.0
10	3,557.9
20	4,232.1
50	5,104.9
100	5,758.9
200	6,410.5

모형을 통해 산정된 확률홍수량을 추정하여 관측홍수량을 통해 산정된 확률홍수량과 비교·분석을 수행하였다. 따라서 확률강수량을 확률홍수량으로 변환하기 위해서는 강우-유출 모형의 최적화를 수행하여야 한다. 따라서 강우-유출모형을 최적화하고 임계지속시간을 추정하여, 추정된 임계지속시간에서 발생한 강수량을 강우-유출모형을 통해 홍수량으로 변환하여 비교하였다.

(1) 강우-유출 모형의 매개변수 최적화 및 임계지속시간의 선정

강우-유출모형은 유출 분석시에 주로 사용되는 SCS 곡선지수 방법, Clark 순간단위도법을 이용하였으며 대표적인 단일강수사상 모형인 HEC-1 프로그램을 사용하여 실시하였다. 강우-유출 모형에서 사용되는 매개변수의 최적화를 위해 모형을 통한 예측값과 관측값을 첨두유량 백분율 오차를 나타내는 목적함수를 이용하였다. 목적함수에 수렴하기 위한 기법으로 단일변량 증감법(univariate gradient method)을 적용하였다.

1997년 07월 01일 자료로 시작하여 2006년 07월 27일 자료까지 총 12개의 안동댐 유역의 관측된 주요 홍수사상을 대상으로 도달시간과 저류상수 값에 대하여 실시하였다. 안동댐 유역의 강우-유출 매개변수는 「안동다목적댐 치수능력증대계획 기본계획 보고서(건설교통부와 한국수자원공사, 2005)」를 바탕으로 초기값을 추정하였다. 12개의 주요 호우사상에 따른 매개변수 검정을 통한 유출수문곡선을 관측수문곡선과 계산치를 비교하여 매개변수의 최적화를 수행하였으며 다음 Figs. 9 and 10은 매개변수를 추정을 위해 분석한 결과를 도시한 것이다.

따라서 12개 주요 호우사상을 통해 추정된 강우-유출모형의 매개변수들을 평균한 값을 검정하여 분석에 이용하였다.

관측유입량의 연최대자료는 지속시간의 개념이 없기

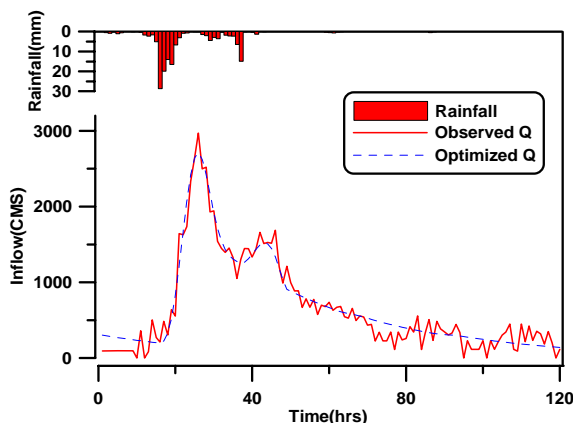


Fig. 9. Optimization of 1999/8/2 Event

때문에 최대값에 대한 지속시간을 추정하여야 한다. 따라서 안동댐 유역에 대한 임계지속시간을 추정하기 위하여 시강수자료를 보유하고 있는 인근 17개 관측소 지점을 대상으로 L-moment기법을 이용한 지역빈도해석을 통해 안동댐의 지속시간별 재현기간별 확률강수량을 산정하고, Huff 시간분포를 이용하였다. 강우-유출 모의방법은 매개변수를 최적화 한 강우-유출모형을 이용하였다.

임계지속시간의 추정을 위해 안동댐 유역 내·외에 위치하고 있는 기상청 관할인 태백, 봉화, 안동, 충주, 울진, 청주, 추풍령, 포항, 대구, 영주, 문경, 영덕, 의성, 구미관측소와 수자원공사에서 관리하고 있는 갈산, 고선, 의촌 지점의 지속시간별 연최대강수량자료를 추출하여 L-moment 기법으로 확률강수량을 산정하였다. L-moment 기법을 적용하기 위해 각 관측소별 연최대치 강수계열을 대상으로 불일치성과 이질성 검정을 수행한 결과에서 선정한 강수관측소들의 지속시간별 연최대치 강수량은 수문학적인 동질성을 갖는 것으로 나타났다. 또한, 확률분포형과의 적합성 척도를 검정한 결과에서 GEV(General Extreme Value)분포형이 최적분포형으로 선정되었다. Table 6는 L-moment 지역빈도해석을 통해 추정된 안동댐 유역의 지속시간별 및 재현기간별 확률강수량을 정리한 것이다.

Table 6에서 제시한 확률강수량을 Huff 4분위법으로 시간분포 하였으며, 강우-유출 모형은 유출 분석 시에 주로 사용되는 SCS 곡선지수 방법, Clark 합성단위도법 등을 이용하여 단일강수 사상 모형인 HEC-1 프로그램을 사용해 확률홍수량을 추정하였다. 지속시간 24시간에서 가장 큰 첨두홍수량을 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서는 지속시간 24시간을 임계지속시간으로 추정하여 모의를 실시하였다. 다음 Fig. 11은 안동댐 유역의 임계지속시간을 결정하기 위해 산정한 확률홍수량을 도시한 결과이다.

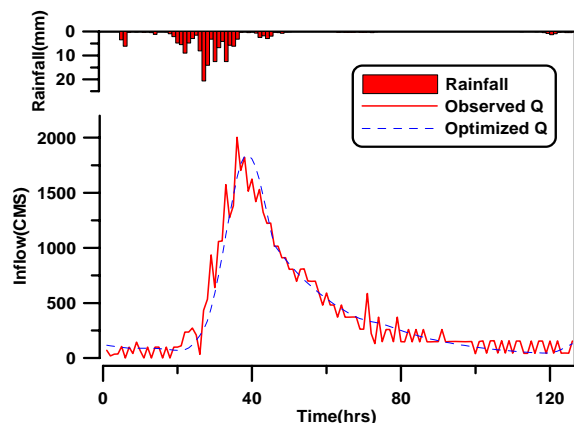


Fig. 10. Optimization of 2004/8/17 Event

Table 6. Probability Precipitation of Regional Frequency Analysis using L-moment Method

Duration (hour)	Return period (years)									
	2	5	10	20	30	50	80	100	150	200
1	33.8	44.5	51.5	58.3	62.3	67.2	71.7	73.8	77.7	80.5
3	53.9	70.9	82.7	94.3	101.1	109.8	117.9	121.8	128.9	134.2
6	72.8	96.4	113.0	129.7	139.7	152.4	164.5	170.3	181.0	189.0
9	86.3	115.8	136.6	157.8	170.4	186.8	202.3	209.9	223.7	234.1
12	96.7	130.4	154.2	178.3	192.8	211.4	229.0	237.6	253.3	265.1
15	104.7	141.8	168.1	194.8	210.8	231.5	251.1	260.7	278.2	291.3
18	111.2	150.8	179.0	207.8	225.2	247.6	269.0	279.5	298.6	313.0
24	121.2	166.3	199.0	232.8	253.5	280.4	306.4	319.1	342.6	360.4
36	135.9	188.5	226.6	266.0	289.9	321.2	351.3	366.0	393.2	413.8
48	144.0	199.8	240.3	282.1	307.5	340.6	372.4	388.0	416.8	438.6
72	158.6	219.4	263.0	307.5	334.5	369.4	402.9	419.2	449.3	471.9

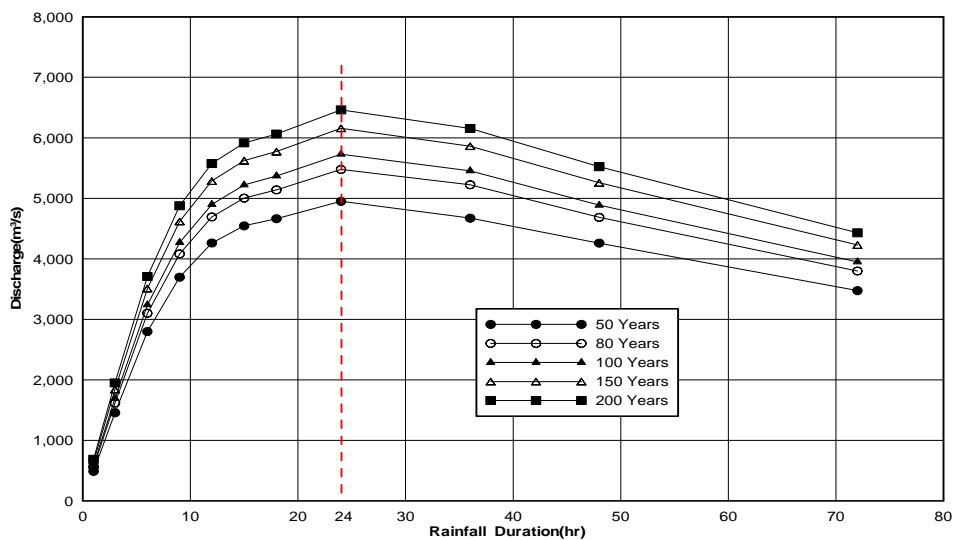


Fig. 11. The Results of Probability Discharges for Decision to Critical Duration

(2) 관측강수량을 이용한 확률강수량의 강우-유출모형 적용

비동질성 Markov 모형을 통해 모의된 강수량자료와 비교하기 위해서는 Markov 모형의 입력자료로 활용된 안동, 봉화 및 태백 지점의 강수량을 통해 산정한 확률강수량을 강우-유출모형을 통해 확률홍수량으로 변환하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 앞에서 분석한 지역빈도해석으로 산정한 확률강수량이 아닌 안동, 봉화 및 태백 지점의 강수분석을 통해 산정된 확률강수량 중에서 임계지속시간인 24시간 확률강수량을 통해 확률홍수량을 추정하였다.

확률홍수량 추정을 위해서는 매개변수 최적화가 수행된 강우-유출 모형을 이용하였으며, 강수의 시간 분포는 Huff 분포를 활용하였다. Huff 분포는 안동댐 유역 내에 위치한 봉화(구 춘양)관측소의 호우자료를 대상으로 분석한 결과를 이용하였으며 봉화관측소 이외에

안동 및 태백관측소가 인근에 위치하고 있으나 안동관측소는 댐하류 안동시에, 태백관측소는 댐상류 유역 끝단에 위치하고 있다. 따라서 안동댐 유역중심에 위치하여 유역특성을 가장 잘 나타내는 대표지점으로서 봉화관측소를 채택하였다.

Fig. 12과 Table 7은 안동댐 유역에 포함된 안동, 봉화 및 태백 강수관측소에 관측된 지속시간별 연최대치 시간강수량 자료를 빈도해석하여 산정된 확률강수량을 최적화 된 강우-유출모형에 적용하여 산정한 안동댐 유역의 확률홍수량을 나타낸 결과이다.

(3) 연최대치 모의강수량의 강우-유출모형 적용

비동질성 Markov 모형을 통해 모의된 지속시간별 200개의 연최대강수량 중 임계지속시간에 해당하는 연최대강수량을 대상으로 강우-유출 모형을 통하여 홍수빈도곡선을 유도하였다. 비동질성 Markov 모형을 통해

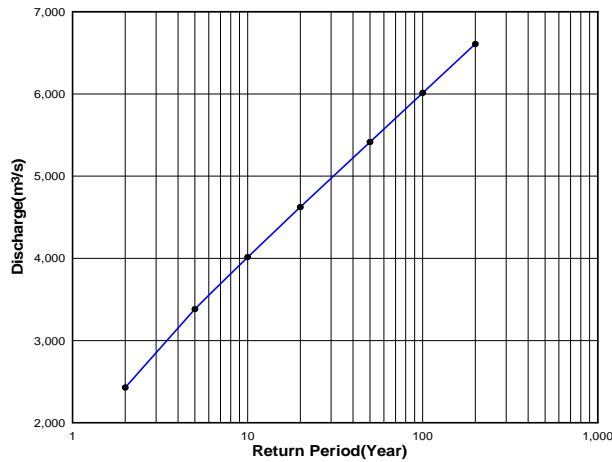


Fig. 12. Probability Discharges of Observed Data

모의된 시간강수량 자료를 활용한 홍수빈도곡선의 유도 과정은 Fig. 13과 같다.

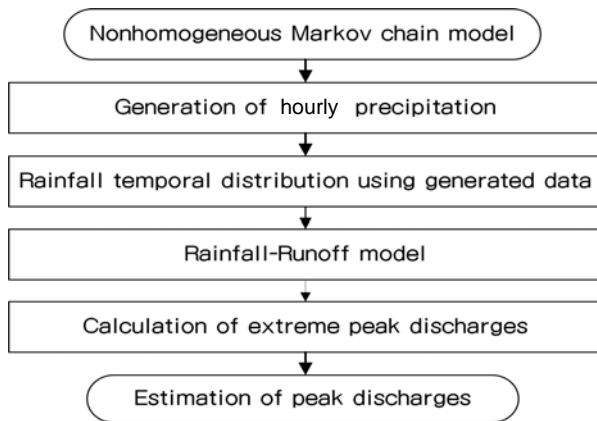


Fig. 13. Diagram of derivation for flood frequency curve

관측강수량을 대상으로 확률홍수량을 산정한 방법과 동일하게 비동질성 Markov 모형을 통해 모의된 지속시간별 200개의 연최대강수량 중 임계지속시간에 해당하는 24시간의 연최대강수량을 Huff 4분위법을 이용하여 1시간 단위로 시간분포시키고, 최적화된 강우-유출 모형을 통하여 200개의 홍수사상을 모의하였다. 강우-유출 모형을 통하여 모의된 200개의 첨두홍수량을 확률지에 도시하고 적정분포형을 적용한 후 재현기간별 확률홍수량을 산정하였다. Fig. 14는 모의된 200개의 첨두홍수량을 Gumbel 확률지에 도시한 결과이다.

5.2.3 각 기법별 확률홍수량의 비교

안동댐 유역에 대하여 임계지속시간 개념에 근거한 강수 지속시간을 추정하여 비동질성 Markov 모형을 통해 모의된 지속시간별 200개의 연최대강수량 중 임계지속시간에 해당하는 연최대강수량을 대상으로 강우-유출

Table 7. Flood Quantiles(m^3/s)

Return period(yr)	Probability discharge
2	2,429
5	3,383
10	4,016
20	4,624
50	5,416
100	6,013
200	6,608

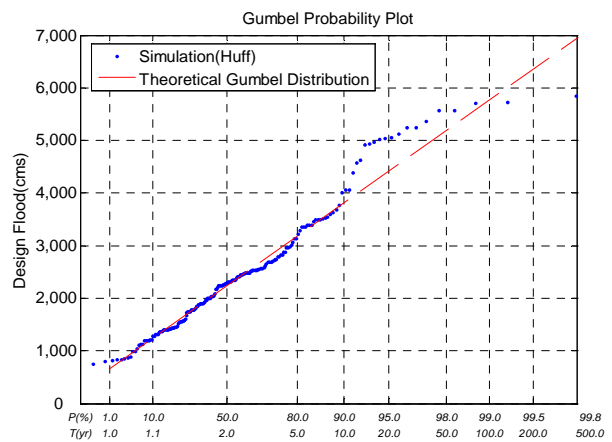


Fig. 14. Illustration of Peak Discharge using Generated Data

모형을 통하여 홍수빈도곡선과 관측강수량을 이용한 확률홍수량 및 관측유입량을 이용한 확률홍수량 산정결과인 Table 8에서 나타난 바와 같이 재현기간이 길어질수록 강수량을 이용하여 산정한 홍수량과 유입량을 이용하여 산정한 확률홍수량이 거의 유사한 값을 가지게 됩니다. 그리고 관측유입량을 이용하여 산정한 확률홍수량을 기준으로 볼 때, 모의강수량을 이용하여 산정한 확률홍수량 결과가 관측강수량을 이용하여 산정한 확률홍수량 결과보다 더 유사한 것으로 나타났습니다. Fig. 15는 Table 8의 확률홍수량을 도시한 결과로써, 유입량 자료의 직접빈도해석(Observed inflow)과 수공구조물 설계시에 가장 많이 쓰이는 확률강수량을 산정하여 강우-유출 모형을 통해 추정된 확률홍수량(Observed Rainfall) 및 모의된 시간강수량 자료 중에서 연최대치에 해당하는 200개 자료를 강우-유출 모형을 통해 홍수량으로 변환하여 추정된 첨두홍수량으로부터 산정한 확률홍수량(Generated Rainfall)을 비교·도시한 결과이다.

Table 8. Comparison of Probability Discharge

Return period (year)	Probability discharge by return period(m ³ /s)				
	Using observed discharge	Using rainfall data			
		Generated precipitation		Observed precipitation	
		Quantiles	difference(%)	Quantiles	difference(%)
2	1,793.9	2,254.0	20.4	2,429.0	26.1
5	2,885.0	3,253.0	11.3	3,383.0	14.7
10	3,557.9	3,914.0	9.1	4,016.0	11.4
20	4,232.1	4,549.0	7.0	4,624.0	8.5
50	5,104.9	5,370.0	4.9	5,416.0	5.7
100	5,758.9	5,985.0	3.8	6,013.0	4.2
200	6,410.5	6,598.0	2.8	6,608.0	3.0

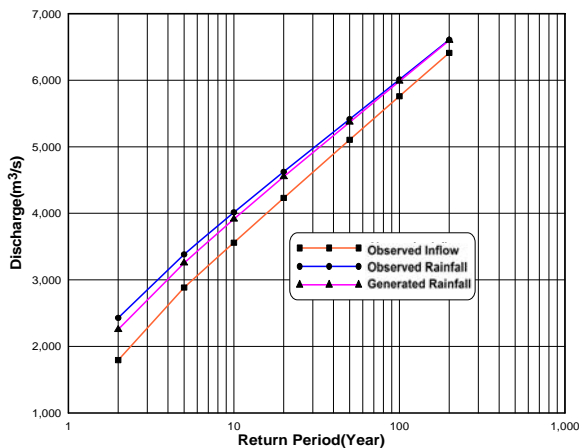


Fig. 15. Illustration of Probability Discharges

6. 결론

본 연구에서는 시간단위 강수계열의 모의발생이 가능한 핵밀도함수를 이용한 비동질성 Markov 모형을 대상유역에 적용하여 관측강수량의 통계특성값과 유사한 결과를 도출함으로써 모형 개발의 적정성을 검증하였고, 확률강수량 및 확률홍수량을 산정하여 그 결과를 관측수문자료를 이용한 결과값과 비교함으로써 그 적용성을 검증하였다.

- 1) 시간단위 강수를 모의 발생시킬 수 있는 다변량 핵밀도함수를 이용한 비동질성 Markov 모형을 구축하고, 대상지점의 시강수계열을 지속시간 1, 3, 6, 12, 24시간 자료를 대상으로 Markov 모형을 통해 50년, 100년, 200년으로 모의발생하였고, 모의된 시강수의 전기간과 습윤기간의 2가지에 대하여 통계적 특성을 비교한 결과 관측자료의 통계적 특성과 거의 유사하면서 최대값은 모의년수가 길어질수록 유연하게 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 다변량 핵밀도함수를 이용한 비동질성 Markov 모형을 통해 모의발생된 강수량을 대상유역의 확률강

수량을 산정하여 관측자료를 이용하여 산정한 결과와 비교하였다. 모의 발생된 강수량의 지속시간별 연최대값을 이용한 확률강수량 산정에 있어서는 관측강수량 자료를 이용하여 산정한 확률강수량과 약 0.8~4.25%의 미미한 차이가 났으며 지속시간이 짧을수록 거의 같아지는 경향을 나타내었다.

- 3) 홍수빈도곡선의 유도에 있어서는 비동질성 모형을 통해 모의 발생된 강수량 중 대상유역의 임계 지속시간에 해당하는 24시간에 대하여 연최대강수량 200개를 추출하여 홍수빈도곡선을 유도하고, 관측강수량과 관측유입량을 이용하여 산정한 확률홍수량과 그 결과를 비교하여 그 적용성을 검토한 결과, 관측유입량을 이용한 확률홍수량 기준으로, 재현기간 2년에서는 20.4%의 다소 큰 차이를 보이지만 재현기간이 길어질수록 그 차이가 거의 없어지는 것으로 나타났으며, 모의강수량을 이용하여 산정한 확률홍수량이 관측강수량을 이용하여 산정한 결과보다 그 차이가 더 작은 것으로 나타났다. 따라서 짧은 기간의 관측강수량을 이용하여 모의발생된 연최대강수량을 강우-유출 모형에 직접 적용시켜 확률홍수량을 산정함으로써 확률강수량 산정을 통하여 산정하는 것보다 결과값에 대한 신뢰성이 있는 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서 제시한 비동질성 Markov모형을 통한 시간강수량의 모의발생을 통해 짧은 시간강수량 관측자료를 보완함으로써 부족한 수문관측자료를 보완할 수 있을 것으로 사료 된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(과제명 : 사면붕괴 예측 및 대응기술 개발) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부, 한국수자원공사 (2005). **안동다목적댐 치수능력증대계획 기본계획 보고서**.
- 강경석 (2000). **다지점 일 강우모형에 의한 일 유출량의 모의발생**. 박사학위논문, 인하대학교.
- 강태호, 이재준, 이종태 (1999). "도시하천에서의 강우, 유출 및 수질 예측(I)-시간강우계열 모형 개발 및 적용." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제19권, 제II-1호, pp. 23-34.
- 국가수자원관리 종합정보 홈페이지(www.wamis.go.kr).
- 문영일, 차영일 (2004). "비동질성 마코프 모형을 이용한 일강수량 자료 모의발생 I-이론-" **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제5B호, pp. 431-435.
- 문영일, 차영일, 서병하 (2004). "비동질성 Markov 모형을 이용한 일강수량 자료 모의발생 II-이론-" **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제5B호, pp.437-441.
- 이원환, 이재준, (1985). "시간적 확률구조를 고려한 일 강수량의 모의발생에 관한 연구." **연세대학교 산업기술연구소 논문집**, 제17집, 제1권, pp. 37-46.
- 이재준, 이정식 (2002). "시간강우계열의 강수발생과정에 대한 추계학적모형." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제35권, 제1호, pp. 109-124.
- 이창훈, 김승 (1995). "회귀분석에 의한 한국의 연·월 평균 강수량의 추정." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제15권, 제5호, pp. 1255-1266.
- 한국수자원공사 (1999). **확률갈수유량 산정 및 이용방법 연구**.
- 한국수자원공사 (2005). **다목적댐 운영 실무편람**.
- Bowman, A. W. (1984). "An alternative method of cross-validation for the smoothing of density estimates", *Biometrika*, Vol. 71, pp. 353-360.
- Bruhn, J. A., W.E. Fry, and Fick, G.W. (1980). "Simulation of daily weather data using theoretical probability distributions." *Jour. Appl. Mete.*, Vol. 19, No. 9, pp. 1029-1036.
- 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.
- Institute of Hydrology (1999). *Flood estimation handbook*. Wallingford, UK.
- 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.
- Rajagopalan, B., Lall, U. and Tarboton, D. (1996). "Nonhomogeneous markov model for daily precipitation." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 33-40.
- Richardson, C. W. (1981). "Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation." *Water Resource Research*, Vol. 17, No. 1, pp. 182-190.
- 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.
- Rudemo, M. (1982). "Empirical choice of histograms and kernel density estimators", *Scand. J. Statist.*, Vol. 9, pp. 65-78.
- 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. 1-34.
- 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.
- Wilks, D.S. (1998). "Multisite generalization of daily stochastic precipitation generation model." *Journal of Hydrology*, Vol. 210, pp. 178-191.

(논문번호:07-142/접수:2007.12.11/심사완료:2008.01.24)