

# 강우의 특성 변화에 따른 유출 특성의 변화분석: 소유역과 중규모 유역에의 적용 비교

## Analysis of Flood Runoff Characteristics due to Rainfall Pattern Change: Comparison of Applications to Small and Medium Size Basins

유철상\* / 김경준\*\*

Yoo, Chulsang / Kim, Kyoungjun

### Abstract

In this study, the probability density functions (PDFs) of the rainfall generated by PRPM(Poisson Rectangular Pulse Model) and the runoff simulated by SLRM(Single Linear Reservoir Model) and Nash model, were compared to find out the changes of runoff characteristics due to the change of rainfall characteristics. Effect of rainfall frequency, intensity, and duration on runoff were evaluated using the PDFs derived. Two basin, small and midium-sized ones, were also selected to find out the effect of basin size. As the results, we found that the arrival time, the intensity, and the duration of rainfall differently influence the runoff characteristics, which could be applied to evaluate the effect of climate change.

**keywords** : PRPM, SLRM, Nash model, PDFs

### 요 지

본 연구에서는 강우의 특성변화가 유출 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 구형펄스모형으로 모의시킨 강우를 선형저수지 모형과 Nash 모형에 유출모의하여 그 유출량에 대한 확률밀도함수와 강우의 확률 밀도함수를 비교하였다. 이를 통해 강우의 발생빈도, 강우강도, 지속시간이 유출에 어떻게 기여하는지에 대하여 파악하였다. 소규모 유역과 중규모 유역에 대한 영향을 분석하기 위하여 두 개의 대상유역을 선정하였다. 그 결과 강우의 발생빈도, 강우강도, 지속시간의 변화에 대하여 유출량이 다양한 특성을 보이는 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 향후 기후변화에 대한 영향을 평가하는데 적용될 수 있을 것이라 판단된다.

**핵심용어** : 구형펄스모형, 선형저수지 모형, Nash 모형, 확률밀도함수

### 1. 서 론

같은 양의 강우가 발생하더라도 강우의 특성에 따라 유출의 특성은 다르게 나타나는 것이 일반적이다(김기욱 등, 2003; 백경록 등, 2000). 여기서 강우의 특성이라

함은 강우의 발생빈도, 강우강도, 지속시간 등을 의미한다. 이러한 강우의 특성 변화에 따른 유출 특성의 변화는 집중호우로 인한 호우나 이와 반대상황인 가뭄의 비정상적인 발생을 유발할 수 있다. 짧은 강우지속시간에 큰 강우강도를 가진 호우사상이 긴 재현기간을 가지고

\* 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수

Asso. Prof., Dept. of Civil and Env. Engrg., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea  
(E-mail: envchul@korea.ac.kr)

\*\* 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정. E-mail: guitar77@korea.ac.kr

발생하는 경우와 상대적으로 긴 강우지속시간에 걸쳐 작은 강우강도로 빈번하게 발생하는 경우를 고려해 본다면, 그 차이점을 확연히 짐작할 수 있다. 이와 같이 강우지속시간, 강우강도, 강우도달시간의 다양한 조합으로 인한 다양한 강우의 형태는 유출에도 큰 영향을 미칠 수밖에 없다.

유출 특성의 변화는 기본적으로 가용수자원의 확보, 하천의 건천화 및 하천유지유량의 확보 및 홍수방어와 관련된 치수문제 등과 같은 많은 문제에 있어 큰 변화를 초래한다. 따라서 강우의 특성에 따른 유출 특성을 정량화하고 이를 규명하는 것은 효과적인 수자원 관리에 있어 매우 중요한 부분이다. 이러한 문제는 최근 크게 문제시 되고 있는 지구 온난화나 기후 변화에 따른 수문환경의 변화에 대한 평가에 있어서도 매우 중요한 부분이 될 것이다. 또한 이러한 변화는 하천유역의 특성에 따라서도 다르게 나타날 수 있다(Aston, 1984; Boorman and Sefton, 1997; Sefton and Boorman, 1997; Niehoff et al., 2002; Evans, 2003; Drogue et al., 2004).

우리나라에서도 수문환경의 변화에 따른 수자원의 평가에 관한 연구는 활발하게 진행되고 있다. 우선 김승과 김현준(1994)은  $2\times\text{CO}_2$  상황에서의 우리나라의 5대강의 유출변화를 물수지 방정식을 이용하여 계산한 바 있고, 최근 김병식 등(2004)은 GCM(General Circulation Model)을 이용하여 얻은 모의 시계열 기상 자료를 입력으로 한 SLURP 모형의 유출해석을 통하여 용담댐 유역에 대한 기후변화에 따른 유출량의 변화를 평가한 바 있다. 또한, 김웅태 등(2004)은 GCM 모의결과를 이용하여 대청댐 유역의 기온 및 강우자료를 Markov 연쇄로 모의 발생하고 이를 유출모의하여 기후 변화에 따른 유출에의 영향을 분석한 바 있다. 이동률 등(2004)은 기후변화에 따른 가뭄과 홍수에의 영향을 분석하기도 하였다.

그러나 이와 같은 연구들은 대체로 장기유출해석에 치중되고 있으며, 중규모 이상의 유역에 주로 적용되고 있다는 특징을 가지고 있다. 그러나 기후변화에 따른 유출 패턴의 변화는 중규모 또는 대규모 유역의 경우보다는 소규모 유역에서 보다 더 심각할 것으로 예상되는데, 기존의 연구들이 대체로 일자료를 이용한 연구들이기 때문에 소규모 유역의 경우처럼 순간적인 유역응답이 발생하는 경우에는 적당하지 않을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 소규모 유역의 유출량 변화양상을 알아보기 위하여 시간 단위 자료를 이용하여 그 영향을 평가하고자 한다.

본 연구에서 사용된 방법은 Biekens and Puente (1990)에 의한 연구와 유사하다. 그들의 연구에서는 구

형펄스모형과 Neyman-Scott 구형펄스모형에 선형저수지 모형(Single Linear Reservoir Model)과 선형저수지 두개를 병렬로 연결한 모형(Parallel Linear Reservoir Model)을 각각 결합하여 만들어지는 유출의 1차 및 2차 통계특성까지를 정량화한 바 있다. 그러나 유출의 전체적인 특성을 나타내는 확률밀도함수를 정량화하지는 못하고 있으며, 바로 이 부분이 본 연구에서 집중하고자 하는 부분이다. 특히, 강우의 특성이 크게 변하는 경우 유출의 특성에 어떤 식으로 영향을 미치는가에 대하여 고찰해 보고자 한다. 본 연구에서는 강우모형으로 구형펄스모형을, 유출해석모형으로 선형저수지모형(Single Linear Reservoir Model)과 Nash 모형을 이용하였다. 또한 유역규모의 영향을 고려하기 위해 소규모 유역인 설마천 유역과 중규모 유역인 소양강댐 유역을 대상유역으로 하여 적용하였다.

## 2. 배경 이론

### 2.1 강우모형: 구형펄스모형(Poisson Rectangular Pulses Model: PRPM)

수문분야에서 흔히 사용되는 구형펄스모형은 Eagleson (1972), Waymire and Gupta(1981), Rodriguez-Iturbe et al.(1984), Rodriguez-Iturbe(1986)등 많은 연구에서 사용되어왔다. 이 모형은 이후 군집특성을 추가로 고려하는 여러 모형들로(Rodriguez-Iturbe et al., 1987; 1988; Entekhabi et al., 1989; Islam et al., 1990) 발전되어 왔으나 여전히 포아송과정을 기본으로 하는 점강우 모형의 전형을 이루고 있는 모형이다. 이 모형은 그 구조가 간단하고 매개변수의 수가 적어 여러 관련 연구에서 많이 이용되고 있기도 하다(Diaz-Granados et al., 1984; Raines and Valdes, 1993; 한국건설기술연구원, 1998; 유철상 등, 2001). 이 모형의 구조 및 특성을 살펴보면 다음과 같다.

구형펄스모형은 개개 강우사상  $\xi(t)$ 의 발생을 나타내는 과정  $N(t)$ 는 매개변수  $\lambda$ 인 포아송과정을 따르고 각 강우사상의 발생시간  $T_n$ 과 더불어 강우사상의 지속시간  $t_r^{(n)}$ 과 강도  $i_r^{(n)}$ 은 한 쌍으로서  $U_n = (t_r^{(n)}, i_r^{(n)})$ 으로 나타낸다(Fig. 1). 따라서  $U_n$ 은 시간  $T_n$ 에 발생한 강우사상의 기본특성이 된다. 각 사상의 특성인  $U_n$ 은 상호 독립적이며 동일하게 분포되어 있고 (independent and identically distributed) 발생시간  $T_n$ 과도 역시 독립적이다. 일반적으로 각 강우사상의 강도와 지속기간은 독립적인 무작위 변수로서 각각 지수확률밀도함수를 따른다고 가정한다.

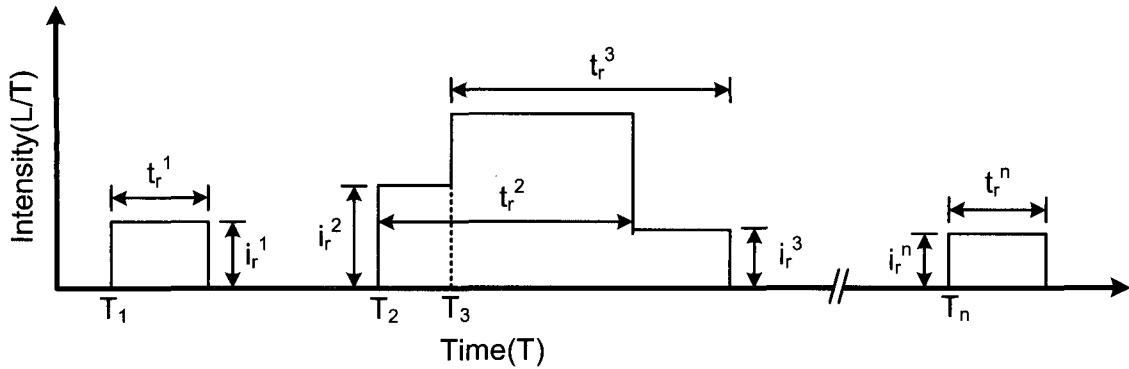


Fig. 1. Concept of Poisson Rectangular Pulses Model(Rodriguez-Iturbe, 1986)

$$f(i_r) = \mu e^{-\mu i_r}, \mu > 0 \quad (1)$$

$$f(t_r) = \eta e^{-\eta t_r}, \eta > 0 \quad (2)$$

따라서,

$$f(U) = f(i_r, t_r) = \mu \eta e^{-\mu i_r - \eta t_r} \quad (3)$$

여기서  $\eta$ 와  $\mu$ 는 강우지속시간과 강우강도에 관한 매개변수로  $E[t_r] = 1/\eta$ ,  $E[i_r] = 1/\mu$ 는 각각 사상의 평균 지속시간과 평균강우강도를 나타낸다. 이러한 모형의 경우 평균강우강도는 다음과 같이 구해진다.

$$E[t_r] = \lambda E[i_r] E[t_r] = \lambda/\mu\eta \quad (4)$$

또한 분산 및 상관함수는 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$Var[\xi(t)] = 2\lambda/\eta\mu^2 \quad (5)$$

$$Corr[\xi(t_1), \xi(t_2)] = R(\tau) = e^{-\eta\tau}, \quad \tau = t_2 - t_1 \geq 0 \quad (6)$$

Eq.(6)으로부터 이 모형의 상관함수가 강우사상의 지속시간  $\eta^{-1}$ 에만 의존한다는 것을 발견할 수 있다. 즉 매개변수  $\lambda$ 와  $\mu$ 는 아무런 역할을 하지 않는다. 아울러  $R(\tau)$ 는 마코프(Markov)과정의 상관함수가 되기 위한 필요충분조건을 갖추고 있다. 정상과정(stationary process)이 되기 위한 조건은 다음과 같이 표현된다.

$$R(t_2 - t_1) = R(t_2 - t_3)R(t_3 - t_1) \quad (7)$$

여기서  $t_1 < t_2 < t_3$ 는 세 개의 임의의 시간이다. 현재까지의 상태에서  $\xi(t)$ 는 연속 매개변수 마코프 체인으로 볼 수 있다. 구형펄스모형의 이러한 마코프 의존 구조는 3개의 중요한 가정의 결과인데, 그 첫째가 사상의 도달시간이 포아송과정을 따른다는 것, 둘째가 사상의 지속시간  $t_r$ 이 상호독립이고 지수분포를 따른다는 것, 셋째가  $t_r^{(n)}$ 과  $i_r^{(n)}$ 이 서로 독립이라는 것이다.

그러나 실제 강우자료는 누가된 형태로 존재하므로 모형의 적용을 위해서는 즉, 매개변수를 추정하거나 주어진 시간축에 대한 모형의 특성을 시험하기 위해서는 주어진 기간  $T$ 에 대해 다양한 시간간격의 누가강수값에 대한 고려가 필요하게 된다. 먼저  $Y_i$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$Y_i = \int_{(i-1)T}^{iT} \xi(s) ds, \quad i = 1, 2, \dots \quad (8)$$

$\xi(t)$ 의 정상성 때문에  $Y_i$ 도  $U_n$ 과 마찬가지로 동일하게 분포됨을 알 수 있다.  $Y_i$ 의 평균, 분산 및 공분산은 다음과 같다.

$$E[Y] = T\lambda/\mu\eta \quad (9)$$

$$Var[Y] = \frac{4\lambda}{\eta^3\mu^2}(\eta T - 1 + e^{-\eta T}) \quad (10)$$

$$Cov[Y_1, Y_k] = \frac{2\lambda}{\eta^3\mu^2}(1 - e^{-\eta T})^2 e^{\eta(k-2)T}, \quad k \geq 2 \quad (11)$$

여기서  $Y_i$ 의 상관구조가  $\eta$ 와  $T$ 에만 의존된다는데 주목할 필요가 있다.

구형펄스모형의 매개변수  $\lambda$ ,  $\eta$ ,  $\mu$ 의 추정은 Eqs. (9)~(11)을 이용하여 수행될 수 있다. 일반적으로 모형의 매개변수는 관측자료의 평균, 분산 및 lag-1 상관계수가 보존되도록 추정된다.

## 2.2 유출모형 1: 선형저수지모형(Single Linear Reservoir Model: SLRM)

본 연구에서는 먼저 강우-유출 과정을 하나의 선형저수지모형으로 가정하였다. 선형저수지는 저류량  $S$ 가 유출량  $Q$ 에 선형적으로 비례하는 가상적인 저수지이며, 따라서 그 유출특성(단위유량도)은 간단한 Eq.(12)와 같이 저류상수  $K$ 를 매개변수로 하는 지수함수로 나타나게 된다(Bras, 1990). 유역의 규모가 큰 경우에 비현실적인 유출응답을 나타내는 단점이 있으나, 이론적인 유출해석을 가능하게 한다는 장점이 있어 본 연구에 채택하였다.

$$h(t) = \frac{1}{K}e^{-t/K} \quad (12)$$

여기서,  $h(t)$ 는 시간  $t$ 에서 순간단위도(IUH, Instantaneous Unit Hydrograph)의 증거,  $K$ 는 저류상수이다.

## 2.3 유출모형 2: Nash 모형

Nash(1957)는 유역전체가 일련의  $n$ 개 저수지로 구성되어 있으며 각 저수지에 대한 저류량( $S$ )과 유출량( $O$ )의 관계는  $S=KO$ 와 같은 저류상수  $K$ 를 갖는 선형관계를 가진다고 가정하였다. 첫 번째 저수지가 순간적으로 만수되어 두 번째 저수지로 유출되고, 두 번째 저수지로부터 세 번째 저수지로 유출되어 마지막  $n$ 번째 저수지를 통과한 유출량을 구하고자 한다고 생각하면

$$I - O = K \frac{dO}{dt} \quad (13)$$

첫 번째 저수지가 순간적으로 만수된 후에는 더 이상의 유입량이 없다고 생각하므로  $I=0$ 이다. 따라서 Eq.(13)은

$$-O_1 = K \frac{dO_1}{dt} \quad (14)$$

Eq.(14)를 풀면

$$O_1 = \frac{1}{K}e^{-t/K} \quad (15)$$

여기서  $O_1$ 은 첫 번째 저수지로부터의 유출량인 동시에 두 번째 저수지의 유입량이다. 따라서, 두 번째 저수지에 대한 Eq.(13)의 관계는

$$O_1 - O_2 = K \frac{dO_2}{dt} \quad (16)$$

Eq.(16)을 풀면

$$O_2 = \frac{1}{K} \left( \frac{t}{K} \right) e^{-t/K} \quad (17)$$

마찬가지 방법으로 세 번째 저수지로부터의 유출량을 구하면

$$O_3 = \frac{1}{2K} \left( \frac{t}{K} \right)^2 e^{-t/K} \quad (18)$$

마지막  $n$ 번째 저수지로부터의 유출량, 즉 전 유역으로부터의 유출량은

$$u_n(t) = \frac{1}{K(n-1)!} \left( \frac{t}{K} \right)^{n-1} e^{-t/K} \quad (19)$$

Eq.(19)는 유역 전반에 걸쳐 순간적으로 내린 단위유출량을  $n$ 개의 저수지를 통해 선형추적하여 얻은 순간단위도(IUH, Instantaneous Unit Hydrograph)의 증거를 계산하는 식이다(윤용남, 2001).

## 2.4 강우발생률, 강우강도, 강우지속시간의 변화에 따른 강우 모의

강우에 따른 유출의 특성변화를 알아보기 위해서는 강우가 가지게 되는 여러 가지 특성, 다시 말하면, 강우 발생률, 강우 강도, 강우 지속시간 등과 같은 특성들의 변화에 따라 변화하는 유출의 특성을 파악하여야 한다. 이와 같은 강우의 특성은 구형펄스모형의 매개변수( $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $\eta$ )를 이용하여 쉽게 모의할 수 있다. 본 연구에서는 강우의 특성에 변화를 주기 위하여 크게 두 가지 경우에 대하여 강우모의를 수행하였다. 첫 번째(Set A)는 강우발생과 관련된 매개변수는 변화시키지 않고, 강우강도와 강우지속시간을 결정하는 매개변수만을 변화시키는 경우이다. 즉 강우발생과 관련된 매개변수( $\lambda$ )는 추정된 매개변수를 그대로 사용하고 강우강도( $1/\mu$ )와 강우지속시간( $1/\eta$ )으로 추정된 매개변수에 2배, 4배, 8배의 변화를 준 경우이다. 두 번째

Table 1. Parameter sets characterized by various rainfall patterns

Set	A			Set	B		
Case	Arrival rate (1/hr)	Intensity (mm/hr)	Duration (hr)	Case	Arrival rate (1/hr)	Intensity (mm/hr)	Duration (hr)
1	$\lambda$	$(1/\mu)/8$	$(1/\eta) \times 8$	1	$\lambda/8$	$1/\mu$	$(1/\eta) \times 8$
2	$\lambda$	$(1/\mu)/4$	$(1/\eta) \times 4$	2	$\lambda/4$	$1/\mu$	$(1/\eta) \times 4$
3	$\lambda$	$(1/\mu)/2$	$(1/\eta) \times 2$	3	$\lambda/2$	$1/\mu$	$(1/\eta) \times 2$
4	$\lambda$	$(1/\mu)$	$(1/\eta)$	4	$\lambda$	$1/\mu$	$(1/\eta)$
5	$\lambda$	$(1/\mu) \times 2$	$(1/\eta)/2$	5	$2\lambda$	$1/\mu$	$(1/\eta)/2$
6	$\lambda$	$(1/\mu) \times 4$	$(1/\eta)/4$	6	$4\lambda$	$1/\mu$	$(1/\eta)/4$
7	$\lambda$	$(1/\mu) \times 8$	$(1/\eta)/8$	7	$8\lambda$	$1/\mu$	$(1/\eta)/8$

(Set B)는 강우발생률을 변화시키는 경우이다. 이 경우에 있어서는 평균강우강도인  $1/\mu$ 는 일정하게 하고 강우 지속시간만을 조정하였다. 총 강우량을 일정하게 유지하기 위해 두 변화의 곱은 항상 1이 되도록 하였다. 위의 두 가지 경우(Set A, Set B)에 대한 내용을 정리하면 Table 1과 같다.

### 3. 실제유역에 적용

#### 3.1 대상유역 및 대상자료

본 연구에서 고려하는 2개의 유출모형이 대상유역의 규모에 따라서 어떤 차이를 나타내는 지를 알아보기 위해 소규모 유역과 중규모 유역을 각각 1개씩 선정하였다. 선형지수지 모형의 경우는 강우에 대한 유역의 응답이 순간적으로 나타나기 때문에 소규모 유역에 적합한 모형이라 할 수 있으며, Nash 모형의 경우는 지체시간이 고려되기 때문에 중규모 유역에 더 적합한 모형이라고 할 수 있다.

규모가 작은 대상유역으로는 건설기술연구원의 시험유역인 설마천 유역을 선정하였다. 설마천은 임진강 하구에서 약 46 km 상류인 경기도 파주시 적성면에 위치하고 있는 임진강의 제 1지류로서, 전체 유역면적 18.5 km<sup>2</sup>, 유로연장 11.3 km인 수지상 형태를 가지고 있는 유역이다. 이 중에서 시험유역은 설마천 유역의 중류부에 위치한 영국군 전적비교를 출구점으로 한다. 설마천 시험유역은 유역면적 8.5 km<sup>2</sup>, 유로연장 5.8 km인 전형적인 산지하천이다. 이 유역은 대부분이 산악지형으로 이루어져 있으며, 유역의 동쪽엔 시험유역에서 가장 높은 감악산(EL. 675 m)이 위치하고 있다. 유역내에는 우량관측소 5개소(전적비교, 비룡포대, 설마리, 범륜사, 감악산), 그리고 수위관측소 2개소(전적비교, 사방댐)가 있다(한국건설기술연구원, 2002).

소양강댐은 우리나라의 대표적인 다목적 댐으로 수도권과 한강유역의 이수뿐만 아니라 치수기능에도 큰

역할을 담당하고 있는 중요한 댐으로서 댐 상류의 유역면적은 2,703 km<sup>2</sup>이며 유로연장은 154.4 km이다. 소양강댐은 위치상으로 춘천시에서 동북방향으로 약 13 km 지점 떨어진 강원도 춘천시 동면과 신북면을 잇는 지점에 위치하고 있으며, 하천상으로는 북한강의 제 1지류인 소양강의 하구에서부터 상류로 약 12 km 지점에 위치하고 있다(최민하 등, 2001). 설마천과 소양강댐의 대상유역도는 Fig. 2와 같다.

구형펄스모형으로 강우를 모의시키기 위하여 유역내에 양질의 강우 자료가 존재하는 강우관측소를 각각 하나씩 선정하였다. 설마천의 경우는 설마리 관측소이며, 소양강댐 유역의 경우는 인제 관측소이다. 대상자료는 1998년 우기(6월~9월) 122일간의 시장우자료(Fig. 3)이며, 기본적인 통계적 특성은 다음과 같다(Table 2). 여기서  $Corr(k)$ 는  $k$ 차 자기상관계수를 나타낸다.

#### 3.2 강우모의

##### 3.2.1 구형펄스모형의 매개변수 추정

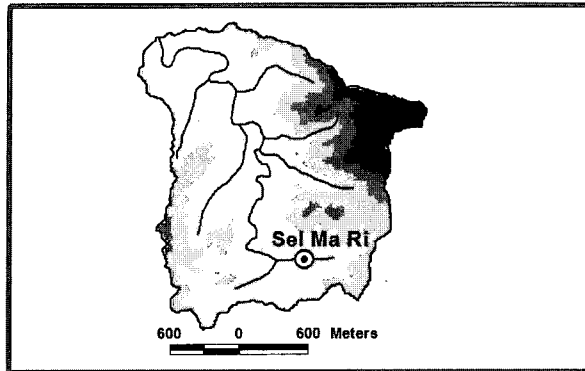
구형펄스모형의 매개변수는 Eqs.(9)~(11)을 이용하여 최적 매개변수를 추정할 수 있다. 추정된 매개변수와 모의된 자료에 대한 통계치들은 Table 3과 같다.

##### 3.2.2 강우의 특성에 따른 통계적 특성변화

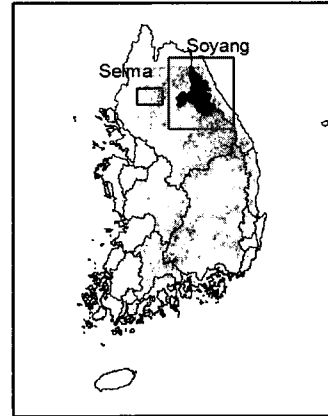
Table 1과 같은 경우를 재현하기 위하여 설마리와 인제 강우관측소에서 추정된 구형펄스모형의 매개변수를 이용하여 Set A, B를 구성하면 Table 4와 같다. 이를 이용하여 100,000 시간 모의한 각각의 자료에 대한 기본적인 통계적 특성치들을 추정하면 Table 5와 같다.

강우발생률에 변화를 주지 않고 강우강도와 지속시간의 변화를 준 경우인 Set A은 Case 1에서 Case 7로 변화함에 따라 강우강도는 커지고 강우지속시간은 줄어드는 경우를 나타내게 된다. 모든 Set에서 Case 4는 원 강우자료에 대한 매개변수를 나타낸다. 따라서 Set A의 Case 1은 강우강도가 작은 강우가 긴 지속시간에 걸쳐 발생한 경우이고 Case 7은 큰 강우강도가 짧은 강우지

**Selma-Cheon Experimental Catchment**



**KEY MAP**



**Soyang River Dam Basin**

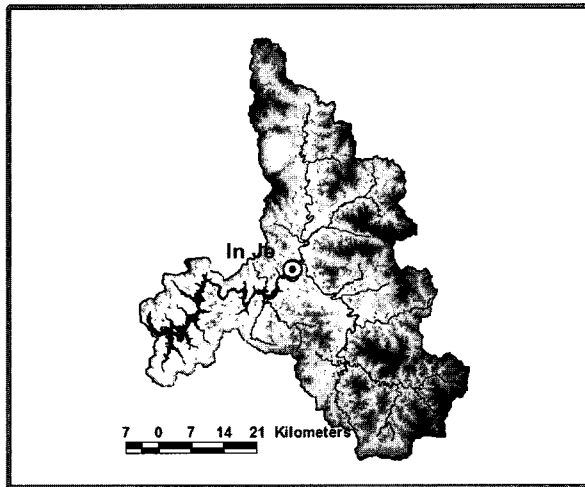


Fig. 2. Study Area and locations of used raingauges

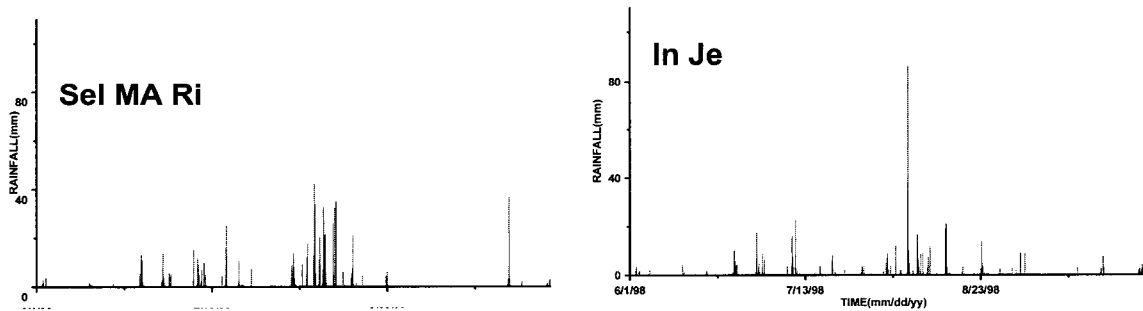


Fig. 3. The data set of two rain gauging stations

Table 2. Basic statistics for the data set of two rain gauging stations

Station	Total Depth (mm)	Mean (mm)	Variance (mm <sup>2</sup> )	Corr(1)	Corr(2)	Corr(3)
Sel Ma ri	1536.5	0.525	7.358	0.588	0.412	0.313
In Je	1102.0	0.376	5.317	0.573	0.315	0.215

Table 3. Parameters and basic statistics of rainfall

Station	$\lambda$ (1/hr)	$1/\mu$ (mm/hr)	$1/\eta$ (1/hr)	Mean (mm)	Variance (mm <sup>2</sup> )	Corr(1)	Corr(2)	Corr(3)
Sel Ma ri	0.04924	9.15286	1.16425	0.518	8.103	0.477	0.200	0.079
In Je	0.03642	9.34352	1.10595	0.368	5.835	0.447	0.176	0.071

Table 4. Poisson rectangular pulses model parameters for cases characterized by the rainfall arrival rate, intensity and duration

Station		Seol Ma Ri			Station		In Je		
Set	Case	$\lambda$ (1/hr)	$1/\mu$ (mm/hr)	$1/\eta$ (hr)	Set	Case	$\lambda$ (1/hr)	$1/\mu$ (mm/hr)	$1/\eta$ (hr)
A	1	0.04924	1.14411	9.31402	A	1	0.03642	1.16794	8.84760
	2	0.04924	2.28822	4.65701		2	0.03642	2.33588	4.42380
	3	0.04924	4.57643	2.32851		3	0.03642	4.67176	2.21190
	4	0.04924	9.15286	1.16425		4	0.03642	9.34352	1.10595
	5	0.04924	18.30572	0.58213		5	0.03642	18.68704	0.55298
	6	0.04924	36.61144	0.29106		6	0.03642	37.37408	0.27649
	7	0.04924	73.22288	0.14553		7	0.03642	74.74816	0.13824
B	1	0.00616	9.15286	9.31402	B	1	0.00455	9.34352	8.84760
	2	0.01231	9.15286	4.65701		2	0.00911	9.34352	4.42380
	3	0.02462	9.15286	2.32851		3	0.01821	9.34352	2.21190
	4	0.04924	9.15286	1.16425		4	0.03642	9.34352	1.10595
	5	0.09848	9.15286	0.58213		5	0.07284	9.34352	0.55298
	6	0.19696	9.15286	0.29106		6	0.14568	9.34352	0.27649
	7	0.39392	9.15286	0.14553		7	0.29136	9.34352	0.13824

Table 5. Basic statistics for rainfall data generated

Station		Sel Ma Ri					Station		In Je				
Set	Case	Mean (mm)	Variance (mm <sup>2</sup> )	Coef. of Skewness	Coef. of Kurtosis	Corr(1)	Set	Case	Mean (mm)	Variance (mm <sup>2</sup> )	Coef. of Skewness	Coef. of Kurtosis	Corr(1)
A	1	0.518	1.175	3.148	16.2	0.915	A	1	0.368	0.831	3.708	20.8	0.909
	2	0.518	2.295	4.451	29.4	0.837		2	0.368	1.639	5.358	41.6	0.827
	3	0.518	4.402	6.298	57.1	0.695		3	0.368	3.146	7.567	80.5	0.678
	4	0.518	8.103	8.861	108.9	0.477		4	0.368	5.835	10.770	161.5	0.447
	5	0.518	13.476	12.160	207.7	0.237		5	0.368	9.590	14.788	314.7	0.211
	6	0.518	18.953	16.307	388.2	0.056		6	0.368	13.143	19.293	550.1	0.050
	7	0.518	21.089	18.525	505.6	0.000		7	0.368	14.558	21.777	698.7	-0.004
B	1	0.518	9.252	9.054	113.4	0.916	B	1	0.369	6.666	11.017	173.2	0.910
	2	0.525	9.454	9.000	109.8	0.852		2	0.380	6.653	10.358	146.4	0.840
	3	0.504	8.227	8.852	108.7	0.698		3	0.360	6.262	10.904	163.5	0.696
	4	0.518	8.103	8.861	108.9	0.477		4	0.368	5.835	10.770	161.5	0.447
	5	0.518	7.273	10.597	195.4	0.232		5	0.375	5.054	10.848	173.3	0.218
	6	0.521	5.339	9.646	163.4	0.065		6	0.378	3.781	10.575	170.6	0.058
	7	0.530	3.780	10.210	192.0	0.006		7	0.378	2.449	11.523	262.1	0.002

속시간을 가지며 발생한 경우이다. 이 경우에 있어서는 강우발생 빈도는 고려하지 않았다. 강우의 총량은 같게 유지되기 때문에 당연히 모든 경우에 있어서 강우 평균은 비슷한 값을 갖는다. 그러나 분산, 왜곡도 계수, 첨예도 계수, 1차 자기상관계수들에서는 큰 차이가 나타난다. 즉, Case 1에서 Case 7로 변화하면서 강우강도가 커지게 되어 극한의 강우가 빈번하게 발생하게 됨에 따라 분산은 점차 커지고, 왜곡도, 첨예도 또한 커지게 되고 1차 상관계수는 점점 감소하는 경향을 가지게 된다.

또한 Set B는 강우 발생률에 변화를 준 경우로 Case

1에서 Case 7로 변화함에 따라 강우발생률이 증가하여 더 빈번하게 강우가 발생하는 경우를 나타낸다. Set B에서도 Case 4는 원자료에 대한 매개변수에 관한 경우이다. 따라서 현재의 상황을 Case 4라 한다면 Case 5, 6, 7은 현재 상황보다 강우가 2배, 4배, 8배 빈번하게 강우가 발생하는 상황을 나타낼 수 있으며 그에 따라 강우 지속시간 또한 2배, 4배, 8배로 감소하게 되는 경우이다. Case 1, 2, 3는 이와 반대로 변하는 경우이다. Set B의 통계적 특성 변화는 Case 1에서 Case 7로 변함에 따라 강우 발생률의 증가와 지속시간의 감소로 분산은

감소하게 되며, 1차 자기상관계수 또한 작아지게 된다. 왜곡도와 첨예도의 경우는 Case 1에서 Case 7로 변환에 따라 뚜렷하지는 않지만 증가하는 경향이 있는 것으로 나타났다.

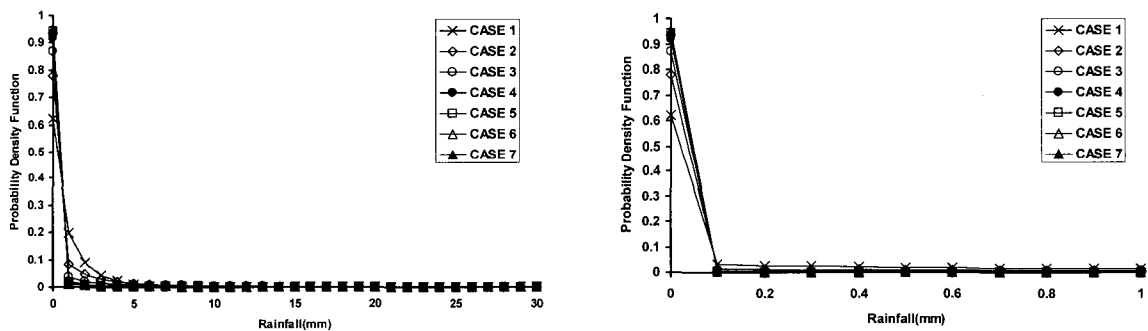
이와 같은 강우의 발생특성 변화에서 극한 상황인 4개의 경우, 즉 Set A의 Case 1과 Case 7, Set B의 Case 1과 Case 7은 각각 다음의 상황을 나타낼 수 있다. 먼저 Set A의 Case 1은 작은 강우강도로 긴 지속시간에 걸쳐 발생하는 상황을 나타낼 수 있으며 Case 7은 돌발 호우 사상과 같이 단 시간에 많은 비가 발생하는 경우로 강우가 발생하는 경우를 나타낼 수 있다. Set B의 Case 1은 강우발생률이 매우 작아 강우의 집중성향이 매우 커지므로 강우가 한번 발생하게 되면 지속시간이 긴 강우가 발생하는 경우이며, Case 7은 짧은 지속시간에 걸쳐 강우가 매우 빈번하게 발생하는 경우를 나타내게 된다. 따라서 Set A의 Case 1과 Set B의 Case 7은 하천의 관리나 수자원 확보 측면에 있어서 크게 문제가 되지 않는 경우가 되지만, Set A의 Case 7은 치수적인 측면에서, Set B의 Case 1의 경우는 이수적인 측면에서의 문제를 야기할 수 있는 강우의 특성이라 할 수 있다. 공교롭게도 이 두 가지의 경우가 기후 변화에 따라서 발생 가능한 강우의 패턴이 되므로(유철상 등, 2002; 김웅태 등, 2004), 향후 하천관리나 수자원의 확보

측면에서 문제의 소지가 있을 가능성이 크다는 것을 판단할 수 있다.

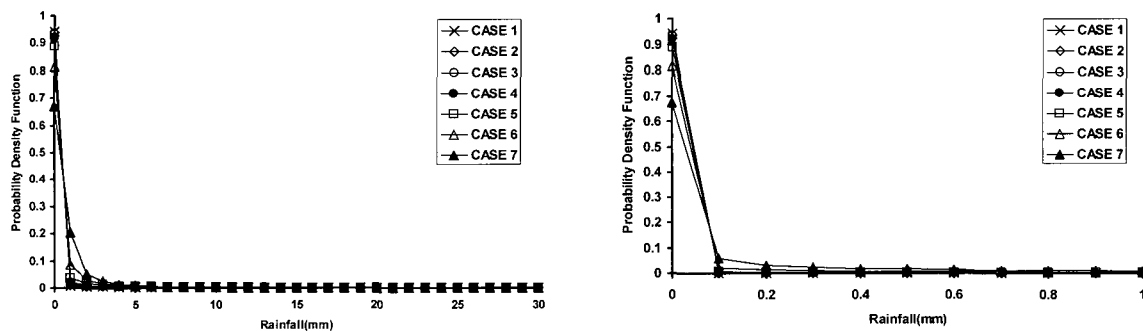
### 3.2.3 강우의 특성 변화에 따른 확률밀도함수의 변화

이와 같은 특성은 발생강우의 확률밀도함수를 살펴보면 뚜렷하게 알 수 있다(Fig. 4). Set A에서 Case 1에서 Case 7로, Set B는 Case 7에서 Case 1로 변해감에 따라 강우의 확률밀도함수는 '0'으로 집중하는 것을 알 수 있다. 강우의 확률밀도함수가 0으로 점점 집중되고 있다는 것은 무강수 확률이 증가한다는 것을 의미하는 것이기도 하며 강우의 변동특성이 커진다는 것을 의미하기도 한다. 반대의 경우는 강우가 점점 고르게 발생한다는 것을 의미한다.

Set A에서 Case 1의 경우는 0~10 mm 정도에 강우가 집중되어 있는 경향이 있다. 그러나 Case 7의 경우는 '0'으로 강우가 집중되어 있지만 여전히 작은 강우에서 큰 강우까지 고르게 분포되어 있음을 확인할 수 있다. 강우의 분포가 고르게 된다는 것은 큰 강우가 발생할 수 있는 확률이 증가한다는 것을 의미하기도 한다. Set B의 경우는 Case 1에서 Case 7로 변화함에 따라 Set A의 Case 7에서 Case 1로 변화하는 경우와 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4의 오른쪽 그림은 강우량의 간격을 0.1 mm로 하여 1 mm까지만의 확률밀도함수를 나타낸 것이다.



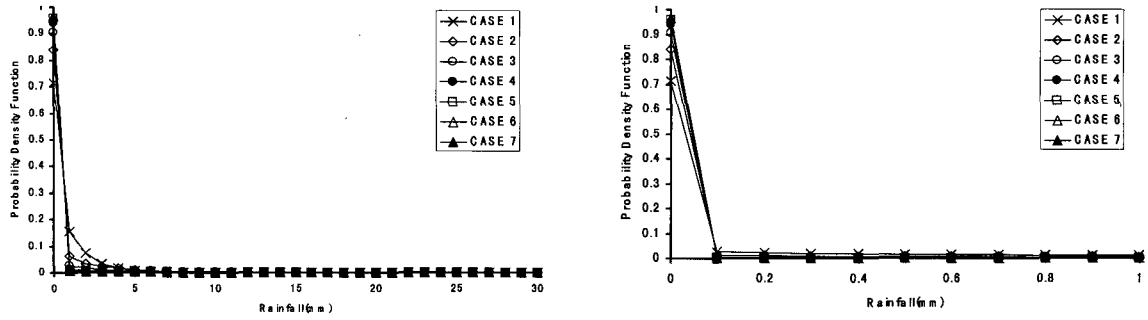
(a) Sel Ma Ri (Set A)



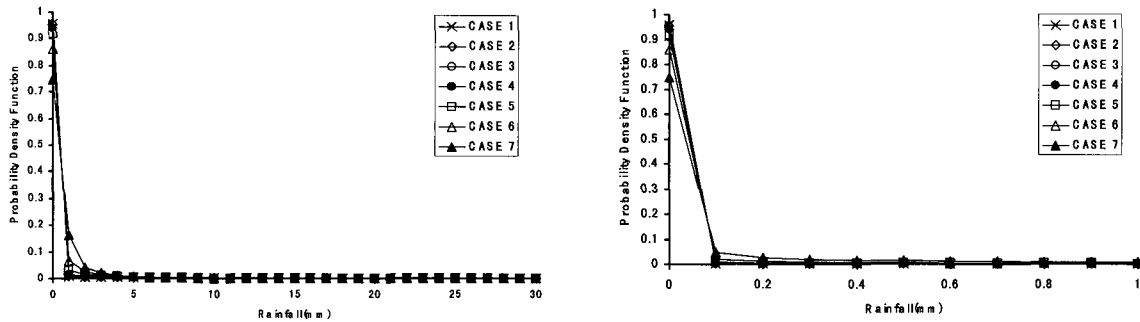
(b) Sel Ma Ri (Set B)

Fig. 4. Sensitivity of rainfall to the rainfall distribution and the rainfall arrival rate (with fixed rainfall amount)(continued)





(c) In Je (Set A)



(d) In Je (Set B)

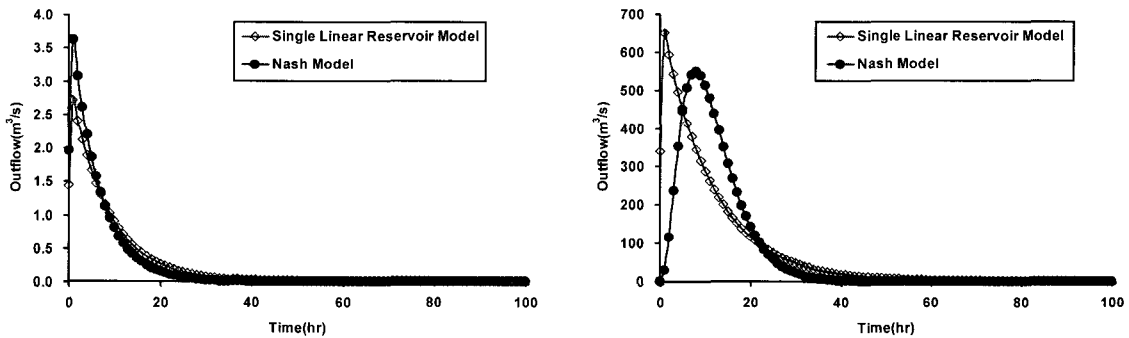
Fig. 4. Sensitivity of rainfall to the rainfall distribution and the rainfall arrival rate (with fixed rainfall amount)

### 3.3 유출모의

#### 3.3.1 단위도

유출모의에 사용될 모형인 선형저수지 모형과 Nash 모형의 적용을 위하여 우선 각 유역에 대한 1시간 대표

단위도를 결정하였다. 설마천의 경우 시험유역의 운영 및 수문특성 조사·연구(한국건설기술연구원, 2002)에서 제시하고 있는 매개변수를, 소양강댐유역의 경우는 최민하 등(2001)의 연구에서 추정된 매개변수를 사용하였다(Table 6, Fig. 5).



(a) Selma experimental catchment

(b) Soyang river basin

Fig. 5. One hour unit hydrograph

Table 6. Parameters of single linear reservoir model and Nash model for the Selma experimental catchment and the Soyang river basin

Parameters	Single linear reservoir model		Nash model	
	$K$	$K$	$n$	
Study area				
Selma	8.186	5.988	1.367	
Soyang	11.052	3.684	3	

Table 7. Basic statistics of runoff for cases with different characteristics (Set A)

Study Area	CASE	SLR Model					Nash Model				
		Mean (mm)	Variance (mm <sup>2</sup> )	Coef. Of Skewness	Coef. Of Kurtosis	Corr(1)	Mean (mm)	Variance (mm <sup>2</sup> )	Coef. Of Skewness	Coef. Of Kurtosis	Corr(1)
Sel-ma	1	1.293	3.962	2.948	14.898	0.994	1.322	4.728	3.012	15.285	0.992
	2	1.293	5.289	3.819	24.416	0.989	1.322	6.666	4.008	26.221	0.985
	3	1.293	6.367	4.603	35.285	0.980	1.322	8.391	4.984	40.396	0.973
	4	1.293	7.058	5.156	44.354	0.968	1.323	9.590	5.739	53.799	0.957
	5	1.293	7.423	5.489	50.619	0.955	1.323	10.251	6.229	64.066	0.940
	6	1.293	7.586	5.681	54.802	0.946	1.323	10.556	6.519	71.280	0.927
	7	1.293	7.628	5.752	56.657	0.943	1.323	10.636	6.630	74.547	0.923
So-yang	1	288.612	227785.9	3.214	17.259	0.995	275.992	252538.9	3.354	18.424	0.996
	2	288.618	290402.8	4.067	27.187	0.991	276.007	331223.2	4.303	29.692	0.993
	3	288.630	336560.1	4.788	37.934	0.984	276.049	381861.4	5.030	40.732	0.991
	4	288.629	364578.9	5.294	47.013	0.975	276.048	403930.8	5.387	47.073	0.990
	5	288.631	378612.8	5.572	52.580	0.965	276.051	411055.6	5.500	49.201	0.989
	6	288.633	384714.4	5.721	55.997	0.959	276.052	413198.4	5.533	49.847	0.988
	7	288.623	386309.5	5.779	57.512	0.957	276.041	413610.0	5.543	50.036	0.988

Table 8. Same as Table 7 (Set B)

Study Area	CASE	SLR Model					Nash Model				
		Mean (mm)	Variance (mm <sup>2</sup> )	Coef. Of Skewness	Coef. Of Kurtosis	Corr(1)	Mean (mm)	Variance (mm <sup>2</sup> )	Coef. Of Skewness	Coef. Of Kurtosis	Corr(1)
Sel-ma	1	1.294	31.125	8.576	109.590	0.994	1.323	37.136	8.773	114.005	0.992
	2	1.311	23.637	8.242	101.281	0.990	1.341	29.475	8.617	109.721	0.988
	3	1.259	11.982	6.645	70.251	0.980	1.287	15.796	7.181	80.745	0.974
	4	1.293	7.058	5.156	44.354	0.968	1.323	9.590	5.739	53.799	0.957
	5	1.292	3.927	4.313	35.348	0.954	1.321	5.416	4.922	45.364	0.939
	6	1.301	2.159	3.600	28.382	0.946	1.330	3.003	4.110	35.870	0.928
	7	1.324	1.393	3.296	25.031	0.944	1.354	1.938	3.806	32.493	0.925
So-yang	1	289.755	1831668.0	9.829	148.037	0.996	277.058	2023656.0	10.235	161.590	0.995
	2	297.981	1254865.0	8.362	103.946	0.991	285.054	1424907.0	8.832	114.120	0.994
	3	282.884	716954.8	7.529	88.558	0.985	270.661	814587.2	7.942	95.895	0.991
	4	288.629	364578.9	5.294	47.013	0.975	276.048	403930.8	5.387	47.073	0.990
	5	294.290	197568.1	4.054	30.325	0.965	281.470	213208.7	3.975	28.097	0.989
	6	296.865	112479.2	3.180	19.944	0.959	283.952	120182.6	3.048	17.602	0.988
	7	296.939	65742.9	3.066	22.863	0.957	284.099	70218.7	2.937	20.118	0.988

Fig. 5를 보면 소규모 유역인 설마천 유역의 경우는 선형저수지 모형과 Nash 모형의 단위도의 지체시간에 있어서 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 즉, 소규모 유역의 경우는 선형저수지 모형이나 Nash 모형의 경우에 강우로 인한 유역의 응답이 비슷할 것이라고 판단된다. 그러나 소양강댐 유역의 경우는 유역의 규모로 인하여 선형저수지의 개수를 1개로 가정하는 경우와  $n$ 개로 가정하는 경우의 단위도는 확연하게 차이가 난다. 이와 같은 단위도의 차이는 유출특성에서 영향을 미칠 것이라 판단된다.

### 3.3.2 기본적인 통계적 특성

모의된 유출량에 대한 기본적인 통계적 특성치인 평균, 분산, 왜곡도계수, 첨예도계수, 1차 자기상관계수는

Tables 7, 8과 같다. 모든 Case에 있어서 강우총량은 보전되기 때문에 모의된 유출량은 모형에 따라 그리고 유역에 따라 같은 값들을 가지게 된다. 그러나 분산, 왜곡도계수, 첨예도계수, 1차 자기상관계수는 Case가 변화함에 따라 다른 값들을 가지게 되는데 대부분 강우에서와 유사한 변화 양상을 가지게 된다. 그러나 Set B의 경우는 강우에서 뚜렷한 경향을 확인할 수 없었던 왜곡도계수와 첨예도계수가 Case 1에서 Case 7로 변화함에 따라 감소함을 보여준다. 통계적 특성들로부터 살펴보면 Set A의 Case 7과 Set B의 Case 1의 경우가 강우에서와 마찬가지로 변동성이 가장 큰 경우이며 따라서 수자원을 관리하는데 매우 어려운 문제들을 야기시킬 것으로 판단할 수 있다.

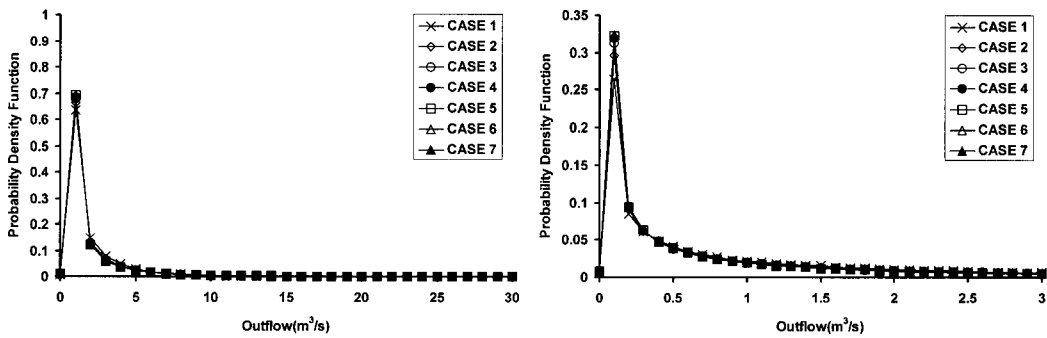
### 3.3.3 확률밀도함수의 변화

다양한 강우특성에 대한 유출특성의 변화를 살펴보기 위하여 유출량에 대한 확률밀도함수를 유도하였다(Figs. 6 and 7). Figs. 6 and 7에서 우측 그래프는 좌측 그래프에서 3 m<sup>3</sup>/sec까지의 유출량을 0.1 m<sup>3</sup>/sec 구간으로 하여 나타낸 확률밀도함수이다. Fig. 6는 강우 발생률은 변화를 주지 않고 강우강도와 강우 지속시간에 변화를 주어 모의한 강우자료(Set A)에 대한 유출모의 결과의 확률밀도함수이다. 전반적으로 강우강도가 감소하고 강우지속시간이 증가할수록(Case 1→Case 7) 저유량의 확률이 감소하고 고유량의 확률이 증가하는 경향을 나타낸다. 즉, 확률밀도함수가 작지만 평활화(smoothing) 된다는 것을 의미한다. 같은 유역에 대한 유출모의 자료라 하더라도 유출모형에 따라서 차이를 보이게 되는데, 이것은 단위도의 모양으로 인한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 중규모 유역의 경우인 소양강댐의 경우에 더 크게 나타나는데 선형저수지 모형과 Nash 모형을 이용한 유출량의 분포가 확연한 차이를 나타낸다.

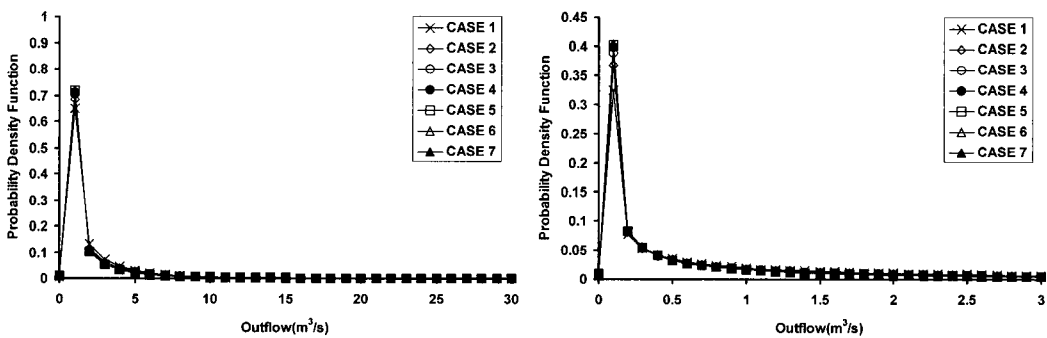
Fig. 7은 강우강도에는 변화를 주지 않고, 강우발생률과 강우지속시간에 변화를 준 경우이다(Set B). 즉, 강우발생률이 증가(감소)함에 따라 강우지속시간은 감소(증가)하게 된다. 따라서 같은 강우강도의 강우가 짧게(길게) 나뉘어져서 더 균등하게(집중되어) 분포되는

특성을 나타내게 되는 것이다. 따라서 유출의 경우도 당연히 더 고르게(집중되어) 분포되게 될 것이다. 유출 결과에서도 이를 확인할 수 있다. 강우발생률이 증가하는 경우는 확률밀도함수가 평활화 되고 그 반대의 경우는 집중성향이 크게 나타난다. 특히, 강우가 특정 강우 강도로 집중될수록 유출의 확률밀도함수는 '0'으로 더욱 집중되는 경향을 나타낸다. 이는 기후변화 등의 영향으로 강우의 집중 성향이 커지는 경우 하천유출이 극단적으로 편중되어 하천관리에 어려움을 줄 수 있다는 것을 나타내는 결과이기도 하다. Set A에서와 마찬가지로 선형저수지 모형과 Nash 모형의 경우도 단위도의 특성상 집중정도는 Nash 모형의 경우가 조금 크지만 큰 차이는 보이지 않고 있다.

전반적으로, 강우의 지속시간이 증가하고 평균 강우 강도가 작아지는 경우에는 강우의 분포도 점점 균등하게 분포되게 되고, 따라서 하천의 유량 또한 미소하나 마 그에 상응하는 분포를 따르는 경향을 나타낸다. 그러나, 강우강도가 증가하고 지속시간이 줄어드는 경우에는 저유량 부분에 분포가 집중되는 경향을 알 수 있다. 또한 강우발생률의 증가는 거의 평활화 된 유출량의 확률밀도함수를 나타내게 되고, 반대로 강우발생률의 감소는 '0' 유량에 집중되는 형태의 확률밀도함수를 나타내게 된다.

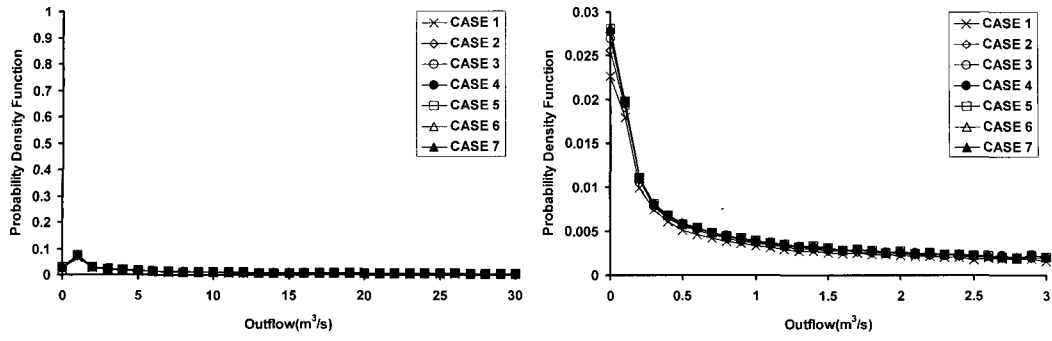


(a) Selma (SLR Model)

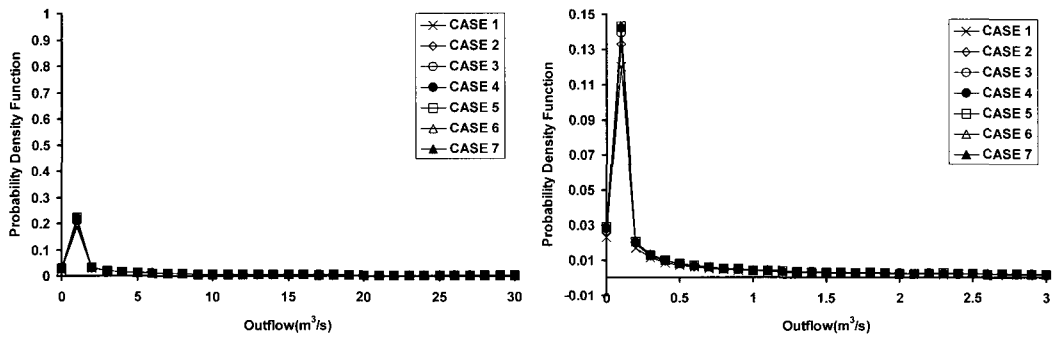


(b) Selma (Nash Model)

Fig. 6. Sensitivity of outflow to the rainfall distributed with fixed rainfall amount(Set A)(continued)

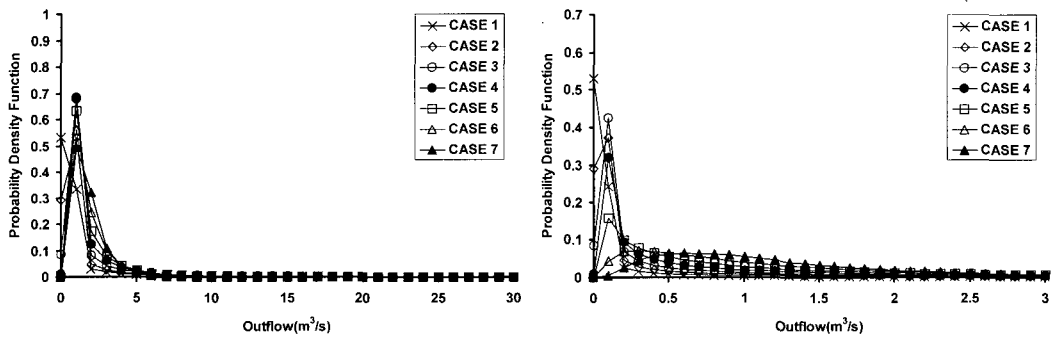


(c) Soyang (SLR Model)

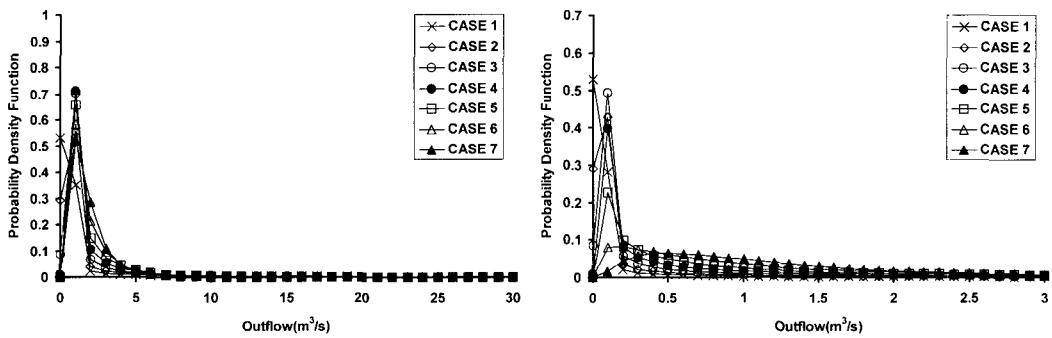


(d) Soyang (Nash Model)

Fig. 6. Sensitivity of outflow to the rainfall distributed with fixed rainfall amount(Set A)

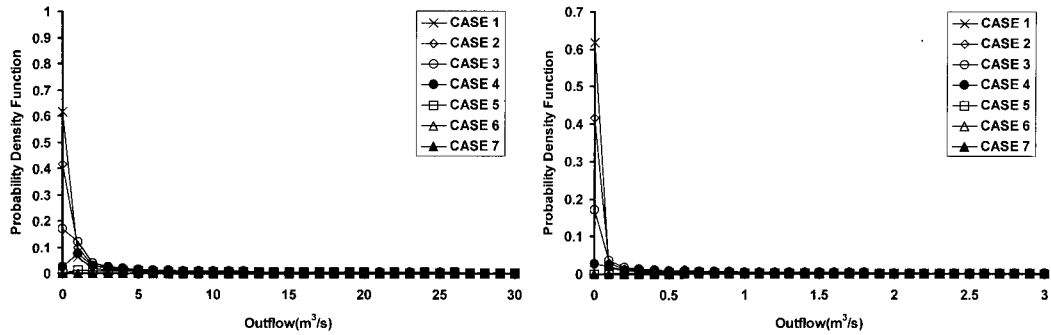


(a) Selma (SLR Model)

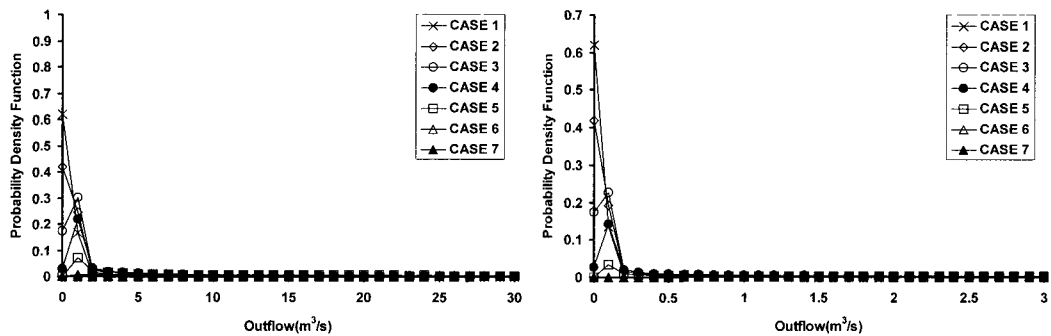


(b) Selma (Nash Model)

Fig. 7. Sensitivity of outflow to the rainfall arrival rate with fixed rainfall amount(Set B)(continued)



(c) Soyang (SLR Model)



(d) Soyang (Nash Model)

Fig. 7. Sensitivity of outflow to the rainfall arrival rate with fixed rainfall amount(Set B)

마지막으로 소규모 유역의 경우와 중규모 유역의 경우인 두 유역에 대해 같은 강우의 특성을 부여한 경우를 비교해 보면, 중규모 유역의 경우보다 소규모 유역의 경우가 강우특성의 변화에 보다 민감하게 반응하는 것을 파악할 수 있다. 즉, 단시간에 많은 양의 강우량이 내리게 되는 강우의 집중성이 증가하는 경우 강우의 총량 자체가 이에 비례하는 정도로 커지지 않는다면 하천의 건천화는 빠르게 진행될 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 구형펄스모형을 이용하여 다양한 특성을 갖는 강우를 모의하고, 이를 선형저수지 모형과 Nash 모형으로 유출해석하여 그 특성을 살펴보았다. 아울러 그 적용 유역을 소규모 유역(설마천 유역) 및 중규모 유역(소양강댐 유역)으로 하여 유역 규모에 대한 민감성이 파악될 수 있도록 하였다. 그 결과 강우총량이 보존되는 경우라도 강우 발생률의 차이에 따라 유출의 특성이 크게 달라짐을 파악할 수 있었으며, 그 변화의 정도도 유역의 규모에 따라 다르게 나타남을 확인하였다. 특히, 소규모 유역의 경우에는 갈수 시 하천유량 확보에 문제가 있을 수 있으며, 중규모 유역의 경우에는 홍수 시 홍수량 증가로 인한 문제점이 커질 수 있음을 파악할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- 김기욱, 노정환, 전용훈, 유철상 (2003). "GIUH 특성숙도에 대한 강우의 영향 분석." 한국수자원학회 논문집, 제36권, 제4호, pp. 533-545.
- 김병식, 김형수, 서병하, 김남원 (2004). "기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향." 한국수자원학회 논문집, 제37권, 제2호, pp. 185-193.
- 김승, 김현준 (1994). 기후변화가 한국의 수자원에 미치는 영향. 한국건설기술연구원, 연구보고서.
- 김용태, 이동률, 유철상 (2004). "기후변화에 따른 대청댐 유역의 유출 영향 분석." 한국수자원학회 논문집, 제37권, 제4호, pp. 305-314.
- 백경록, 최종남, 유철상, 김중훈 (2000). "강우-유출관계의 변동성에 관한 고찰." 대한토목학회 논문집, 제20권, 제3-B호, pp. 377-386.
- 유철상, 김남원, 정광식 (2001). "점 강우모형과 강우강도-지속시간-생기빈도 해석." 한국수자원학회 논문집, 제34권, 제6호, pp. 577-586.
- 유철상, 정광식, 강인주 (2002). "지구온난화에 따른 일강수분포의 변화 평가." 대한토목학회 논문집, 제22권, 제3-B호, pp. 291-299.
- 윤용남 (2001). 공업수문학, 청문각.
- 이동률, 김용태, 유철상 (2004). "기후변화가 기상학적

- 가뭄과 홍수에 미치는 영향." **한국수자원학회 논문집**, 제37권, 제4호, pp. 315-328.
- 최민하, 안재현, 김중훈, 윤용남 (2001). "최적화 기법을 이용한 Nash 모형과 Diskin 모형의 매개변수 추정." **2001년 학술발표회 논문집(1)**, pp. 638-643.
- 한국건설기술연구원 (1998). **강우의 시·공간적 분포 특성: 점 강우모형 매개변수 추정**. 건기연 98-155, 한국건설기술연구원.
- 한국건설기술연구원 (2002). **시험유역의 운영 및 수문특성 조사연구**. 건기연 2002-056, 한국건설기술연구원.
- Aston, A.R. (1984). "The effect of doubling atmospheric CO<sub>2</sub> on streamflow: a simulation." *Journal of Hydrology*, Vol. 67, pp. 273-280.
- Bierkens, M.F.P., and Puente, C.E. (1990). "Analytically derived runoff models based on rainfall point process." *Water Resource Research*, Vol. 26, No. 11, pp. 2653-2659.
- Boorman, D.B., and Sefton, C.E.M. (1997). "Recognising the uncertainty in the quantification of the effects of climate change on hydrological response." *Climatic Change*, Vol. 35, pp. 415-434.
- Bras, R.L. (1990). *Hydrology: An Introduction to Hydrologic Science*, Addison-Wesley Publishing Company.
- Diaz-Granados, M.A., Valdes, J.B., and Bras, R.L. (1984). "A physically based flood frequency distribution." *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 2, pp. 295-302.
- Drogue, G., Pfister, L., Leviandier, T., El Idrissi, A., Iffly, J.F., Matgen, P., Humbert, J., and Hoffmann, L. (2004). "Simulating the spatio-temporal variability of streamflow response to climate change scenarios in a mesoscale basin." *Journal of Hydrology*, Vol. 293, pp. 255-269.
- Eagleson, P.S. (1972). "Dynamics of flood frequency." *Water Resources Research*, Vol. 8, No. 4, pp. 878-898.
- 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.
- Evan, J.P. (2003). "Improving the characteristics of streamflow modeled by regional climate models." *Journal of Hydrology*, Vol. 284, pp. 211-227.
- 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.
- Nash, J.E. (1957). "The form of the instantaneous unit hydrograph." *International Association of Society Hydrology*, Pub. 45, Vol. 3, pp. 114-121.
- Niehoff, D., Fritsch, U., and Bronstert, A. (2002). "Land-use impacts on storm-runoff generation: scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany." *Journal of Hydrology*, Vol. 267, pp. 80-93.
- Raines, T.H., and Valdes, J.B. (1993). "Estimation of flood frequencies for ungaged catchments." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No. 11, pp. 1611-1619.
- 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. (1986). "Scale of fluctuation of rainfall models." *Water Resource Research*, Vol. 22, No. 9, pp. 15S-37S.
- Rodriguez-Iturbe, I., Febres De Power, B., and Valdes, J.B. (1987). "Rectangular pulses point process models for rainfall: Analysis of empirical data." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, No. D8, pp. 9645-9656.
- 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.
- Sefton, C.E.M., and Boorman, D.B. (1997). "A regional investigation of climate change impacts on UK streamflows." *Journal of Hydrology*, Vol. 195, pp. 26-44.
- Waymire, E., and Gupta, V.K. (1981). "The mathematical structure of rainfall representation I. A review of the stochastic rainfall models." *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 5, pp. 1261-1272.

(논문번호:4-114/접수:2004.12.13/심사완료:2006.03.31)