

시간적 군집특성을 고려한 강우모의모형의 선정

A Selection of the Point Rainfall Process Model Considered on Temporal Clustering Characteristics

김기욱* / 유철상**

Kim, Keewook / Yoo, Chulsang

Abstract

This study, a point rainfall process model, which could represent appropriately observed rainfall data, was to select. The point process models - rectangular pulses Poisson process model(RPPM), Neyman-Scott rectangular pulses Poisson process model(NS-RPPM), and modified Neyman-Scott rectangular pulses Poisson process model(modified NS-RPPM) - all based on Poisson process were considered as possible rainfall models, whose statistical analyses were performed with their simulation rainfall data. As results, simulated rainfall data using the NS-RPPM and the modified NS-RPPM represent appropriately statistics of observed data for several aggregation levels. Also, simulated rainfall data using the modified NS-RPPM shows similar characteristics of rainfall occurrence to the observed rainfall data. Especially, the modified NS-RPPM reproduces high-intensity rainfall events that contribute largely to occurrence of natural hazard such as flood and landslides most similarly. Also, the modified NS-RPPM shows the best results with respect to the total rainfall amount, duration, and inter-event time. In conclusions, the modified NS-RPPM was found to be the most appropriate model for the long-term simulation of rainfall.

keywords : Point rainfall process model, Poisson process

요 지

본 연구에서는 관측강우의 통계특성 및 발생특성을 가장 적절하게 재현해 주는 강우모형을 선정하고자 하였다. 강우모형으로 Poisson과정에 근거한 점과정모형인 RPPM, NS-RPPM, modified NS-RPPM을 고려하여 모의자료에 대한 통계분석을 수행하였다. 그 결과, NS-RPPM과 modified NS-RPPM을 이용하여 모의된 자료가 여러 집계시간의 통계치를 적절하게 재현하였다. 또한 modified NS-RPPM을 이용하여 모의된 자료가 관측자료와 가장 유사한 발생특성을 가지는 것을 알 수 있었다. 특히, 홍수, 산사태 등 자연재해의 발생에 큰 영향을 주는 큰 강도를 가지는 강우를 관측치와 가장 유사하게 재현하였다. 모의된 강우사상의 총 강우량, 강우기간, 강우사상 간의 간격을 관측강우와 비교해본 결과 또한 modified NS-RPPM이 가장 좋은 결과를 보였다. 본 연구의 결과를 종합해 볼 때, 강우의 장기 모의를 위해 modified NS-RPPM을 이용하는 것이 가장 적절할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 강우모형, Poisson과정

* 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학과 박사수료

Doctoral Student, Dept. of Architectural, Civil & Environmental Eng., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea
(e-mail: kkw5287@korea.ac.kr)

** 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학과 교수

Prof., Dept. of Architectural, Civil & Environmental Eng., Korea Univ., Seoul 136-713, Korea

1. 서 론

최근 이상기후에 의한 국지적 폭우가 증가함에 따라 강우 시 산사태 및 이로 인한 토사유출의 문제가 심각하게 대두되고 있다(박상덕, 2002; 이수곤, 2002; 신현석 등, 2007; Avanzi *et al.*, 2004; Calcaterra and Santo, 2004). 유역 내에서 발생하는 크고 작은 산사태는 인명과 재산의 피해는 물론 하천생태계의 큰 교란을 유발하게 된다. 국제적으로도 많은 연구들이 극치강우에 의한 토사유출 문제에 초점을 맞추고 있다(Meyer *et al.*, 2001; Avanzi *et al.*, 2004; Calcaterra and Santo, 2004; Guzzetti *et al.*, 2004; Cheng *et al.*, 2005). 특히, 극심한 산사태나 토석류들은 주로 극치강우에 의해 발생하게 된다고 알려져 있다. Kirchner *et al.*(2001)은 아이다호 유역 토양 내의 우주방사성핵종(cosmogenic radionuclide)에 대한 농도분석을 통해 기간이 증가함에 따라 평균 비퇴사량이 증가함을 보였으며, 소수의 극치강우에 의하여 대부분의 토사가 발생하였음을 밝힌 바 있다. 또한 Austin(1994)은 몇 가지 증거를 들어 그랜드 캐년이 기준에 알려져 있는 바와 같이 수 천 만년 동안의 콜로라도 강의 침식작용에 의해 생성된 것이 아니라 대규모 홍수에 의해 빠르게 생성되었다고 주장하였으며, 이러한 주장은 이후 여러 과학자들에 의해 확인되었다(Perkins, 2000).

이러한 연구결과들은 몇몇 극치강우에 의하여 발생한 토사량이 장기 토사발생량의 많은 부분을 차지하게 됨을 의미한다. 즉, 산사태나 토석류의 발생에 있어 극치강우의 역할이 매우 중요함을 나타내는 결과이다. 그러나 아직 그 관련성에 대한 연구는 충분하지 않다. 이는 기본적으로 관측자료의 한계 때문이며, 특히 강우 및 산사태의 발생이 장기간 체계적으로 기록된 것은 찾아보기 어렵다. 우리나라의 경우도 태풍 ‘루사’, ‘매미’ 및 최근 2006년의 호우 시 관련 재해가 산사태에 집중되어 이에 대한 관심이 증가되고 있는 정도이며, 아직 체계적인 관측은 이루어지고 있지는 않다. 이러한 상황에서 강우에 따른 토사발생특성의 파악은 매우 어려운 문제이나, 토사발생에 대한 대책 마련을 위해 반드시 해결되어야 하는 문제이기도 하다.

앞에서 설명한 바와 같이 토사의 발생은 주로 강우에 의해 지배되므로 토사발생특성의 파악을 위해서는 토사발생모의를 위한 강우자료가 필요하다. 하지만 관측강우의 경우 토사발생특성을 파악하는데 충분한 기간의 자료가 확보되어 있지 않은 것이 보통이다. 따라서 토사발생모의를 위해서는 관측강우의 특성을 적절하게 재현해 줄 수 있는 강우의 장기모의가 필요하다. 이 때,

토사의 발생에 큰 영향을 주는 강우의 통계특성 및 발생특성을 강우모형을 통해 적절하게 재현하여야 한다. 이러한 관측강우의 적절한 재현은 단지 토사발생모의를 위해서 뿐만 아니라 강우자료의 보완이나 확충이 필요한 분야에서 반드시 선행되어야 하는 부분이다. 본 연구에서는 이를 위해 포아송과정(Poisson process)에 근거한 점과정 모형(point process model)을 적용해보고자 하였다.

일반적으로 포아송과정에 근거한 점과정 모형에서의 어떤 사상의 발생은 포아송 과정을 따르고 그 사상의 강도와 지속기간은 지수분포를 따르는 것으로 가정한다. 수문학 분야에서는 주로 강우를 모형화 하는데 이용되어 왔으며 대표적인 연구로서 Rodriguez-Iturbe *et al.*(1984), Entekhabi *et al.*(1989), Islam *et al.*(1990) 등을 찾아볼 수 있다. 이러한 모형들은 강우의 군집(clustering)을 보다 강화하기 위해 Bartlett-Lewis나 Neyman-Scott 과정을 고려하는 보다 복잡한 모형(Rodriguez-Iturbe *et al.*, 1987)으로 발전되었고, 이후에는 군집효과를 조절한 수정 모형(Rodriguez-Iturbe *et al.*, 1988; Entekhabi *et al.*, 1989)이 제시되었다. 국내에서는 금중호 등(2001), 유철상 등(2002), 유철상과 김대하(2006) 등과 같은 관련연구를 살펴볼 수 있다.

본 연구에서는 관측강우의 통계특성 및 발생특성을 적절하게 재현해 줄 수 있는 모형을 선정하고자 한다. 이를 위해 점강우모형인 구형펄스모형(Rectangular Pulses Poisson Process Model; RPPM), Neyman-Scott 구형펄스모형(Neyman-Scott Rectangular Pulses Poisson Process Model; NS-RPPM), 수정 Neyman-Scott 구형펄스모형(modified Neyman-Scott Rectangular Pulses Poisson Process Model; modified NS-RPPM)을 고려하여 모의자료에 대한 통계분석을 수행하였다.

2. 점강우모형

2.1 구형펄스모형(RPPM)

구형펄스모형은 강우사상 간의 간격(λ), 각 사상의 강도(μ), 지속시간(η)의 세 개의 매개변수로 구성된다. 개개의 사상은 매개변수 λ 인 포아송 과정을 따라 발생하며, 각 사상의 강도 및 지속시간은 각각 매개변수 μ , η 인 지수함수를 따라 발생하는 것으로 가정한다.

개개의 사상을 $Y(t)$ 라 할 때, 실제 관측자료는 누가된 형태로 존재하므로 매개변수를 추정하거나 주어진 시간축척에 대한 모형의 특성을 시험하기 위해서는 주어진 시간간격의 집성시간(aggregation time)에 대한

고려가 필요하다. 따라서 집성시간 h 인 자료는 Eq. (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$Y_i^{(h)} = \int_{(i-1)h}^{ih} Y(t)dt, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

$Y_i^{(h)}$ 의 평균, 분산 및 공분산은 Eqs. (2)~(4)와 같다.

$$E[Y_i^{(h)}] = \frac{h\lambda}{\mu\eta} \quad (2)$$

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

$$Cov[Y_i^{(h)}, Y_{i+k}^{(h)}] = \frac{2\lambda}{\eta^3\mu^2}(1 - e^{-\eta h})^2 e^{-\eta(k-1)h}, \quad k \geq 1 \quad (4)$$

위의 Eqs. (2)~(4)를 이용하여 RPPM의 매개변수를 추정할 수 있다. 일반적으로 모형의 매개변수는 관측자료의 평균, 분산 및 lag-1 공분산이 보전되도록 추정한다.

RPPM은 매개변수의 추정 및 강우모의과정이 매우 간편하지만 강우의 시간적 군집이 실제의 강우보다 약하게 나타나며 따라서 강우의 자기상관구조를 적절하게 재현하지 못하는 단점을 가진다(Rodriguez-Iturbe *et al.*, 1987). 이에 따라 강우 모의과정에서 Bartlett-Lewis나 Neyman-Scott 과정을 고려하여 강우의 시간적 군집을 강화하는 방법(Rodriguez-Iturbe *et al.*, 1987)이 개발되었다.

2.2 Neyman-Scott 구형펄스모형(NS-RPPM)

Neyman-Scott 구형펄스모형은 강우사상의 간격(λ), 각 사상별 강우세포의 개수(ν), 각 사상의 시점으로부터 강우세포까지의 거리(β), 강우세포의 강도(ξ), 강우세포의 지속시간(η)의 다섯 개의 매개변수로 구성된다. 개개의 사상은 매개변수 λ 인 포아송 과정을 따라 발생

$$E[Y_i^{(h)}] = \frac{h\lambda\nu\xi}{\eta} \quad (5)$$

$$Var[Y_i^{(h)}] = \frac{\lambda}{\eta^3}(\eta h - 1 + e^{-\eta h}) \left\{ 4\nu\xi^2 + 2(\nu^2 - \nu)\xi^2 \frac{\beta^2}{\beta^2 - \eta^2} \right\} - \lambda(\beta h - 1 + e^{-\beta h}) \frac{2(\nu^2 - \nu)\xi^2}{\beta(\beta^2 - \eta^2)} \quad (6)$$

$$Cov[Y_i^{(h)}, Y_{i+k}^{(h)}] = \frac{\lambda}{\eta^3}(1 - e^{-\eta h})^2 e^{-\eta(k-1)h} \left\{ 2\nu\xi^2 + \frac{(\nu^2 - \nu)\xi^2\beta^2}{\beta^2 - \eta^2} \right\} - \lambda(1 - e^{-\beta h})^2 e^{-\beta(k-1)h} \frac{(\nu^2 - \nu)\xi^2}{\beta(\beta^2 - \eta^2)} \quad (7)$$

하며, 강우세포의 개수는 ν 를 매개변수로 가지는 포아송 분포 혹은 기하 분포(geometric distribution)에 의해 발생한다. 아울러, 각 사상의 시점으로부터 강우세포까지의 거리, 강우세포의 강도 및 지속시간은 각각 매개변수 β , ξ , η 인 지수함수를 따라 발생하는 것으로 가정한다. 본 연구에서는 강우세포의 발생 시 강우의 특성을 더 효과적으로 재현해 주는 것으로 평가된 기하 분포를 이용하였다(Velghe *et al.*, 1994). 또한 '0'의 발생을 막기 위해 $\nu-1$ 의 매개변수를 가지는 기하분포를 이용하여 값을 생성한 후 생성된 값에 '1'을 더하여 이용하였다.

집성시간 h 인 강우자료를 Eq. (1)과 같이 정의하면, $Y_i^{(h)}$ 의 평균, 분산 및 공분산은 Eqs. (5)~(7)과 같다.

아래의 Eqs. (5)~(7)을 이용하여 NS-RPPM의 매개변수를 추정할 수 있다. 추정해야 하는 매개변수가 5개이므로 5개의 식을 이용하여 매개변수를 추정해야 한다. 일반적으로 평균의 경우 집성시간에 대하여 선형적으로 증가하므로 집성시간 1시간의 평균, 분산, 공분산으로 세 개의 식을 구성하고 다른 집성시간에 대한 분산, 공분산을 이용하여 나머지 두 개의 식을 구성하게 된다(Entekhabi *et al.*, 1989).

NS-RPPM은 RPPM에서 강우사상의 발생(λ)만을 이용하여 모의하는 강우의 발생을 강우사상의 발생(λ), 각 강우사상에 대한 강우세포의 개수(ν), 강우사상의 발생으로부터 강우세포까지의 거리(β)의 세 개의 매개변수를 이용하여 모의함으로써 강우의 군집특성을 보다 현실적으로 표현할 수 있다. 따라서 각 집성시간에 대한 관측자료의 자기상관특성을 잘 재현하는 장점이 있다(Rodriguez-Iturbe *et al.*, 1987). 그러나 강우의 군집을 실제보다 과대추정하여 결과적으로 무강우확률이 과대추정되는 경향이 있으며, 이러한 경향은 모의된 자료를 강우-유출 또는 침투해석과정에 입력으로 사용할 경우 그 결과에 심각한 왜곡을 가져올 수 있다(Entekhabi *et al.*, 1989).

2.3 수정 Neyman-Scott 구형펄스모형(modified NS-RPPM)

수정 Neyman-Scott 구형펄스모형은 NS-RPPM과 같이 강우사상의 간격(λ), 각 사상별 강우세포의 개수(ν), 각 사상의 시점으로부터 강우세포까지의 거리(β), 강우세포의 강도(ξ), 강우세포의 지속시간(η)의 다섯 개의 매개변수를 가진다. 그러나 지속시간이 고정된 값이 아니라 각 강우사상마다 척도 매개변수(scale parameter) θ 와 형상 매개변수(shape parameter) α 를 가지는 감마분포에 의해 무작위로 발생된다는 것이 NS-RPPM과 다른 점이다. 따라서 modified NS-RPPM의 매개변수는 총 6개가 된다.

개개의 사상은 매개변수 λ 인 포아송 과정을 따라 발생하며, 강우세포의 개수는 ν 를 매개변수로 가지는 포아송 분포 혹은 기하 분포(geometric distribution)에 의해 발생한다. 아울러, 각 사상의 시점으로부터 강우세포까지의 거리, 강우세포의 강도 및 지속시간은 각각 매개변수 β , ξ , η 인 지수함수를 따라 발생하는 것으로 가정한다. 여기서, η 는 각 강우사상마다 척도 매개변수(scale parameter) θ 와 형상 매개변수(shape parameter) α 를 가지는 감마분포에 의해 무작위로 발생하게 된다.

집성시간 h 인 강우자료를 Eq. (1)과 같이 정의하면, $Y_i^{(h)}$ 의 평균, 분산 및 공분산은 Eqs. (8)~(10)과 같다.

$$E[Y_i^{(h)}] = h\lambda\nu\xi I(1,0) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[Y_i^{(h)}] &= [h\lambda\nu\xi I(1,0)]^2 \\ &+ \left\{ 2C_1h + \frac{C_2}{\beta^3}(\beta h - 1 + e^{-\beta h}) + (h\lambda\nu\xi)^2 \right\} I(2,0) \\ &- 2C_1I(3,0) - C_2hI(4,0) + C_2I(5,0) \\ &+ 2C_1I(3,h) - C_2I(5,h) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{Cov}[Y_i^{(h)}, Y_{i+k}^{(h)}] &= C_1I(3, kh-h) - 2C_1I(3, kh) \\ &+ C_1I(3, kh+h) - \frac{C_2}{2}I(5, kh-h) \\ &+ C_2I(5, kh) - \frac{C_2}{2}I(5, kh+h) \\ &+ \frac{C_2}{2\beta^3}(1 - e^{-\beta h})^2 e^{-\beta(k-1)h} I(2,0) \\ &+ (h\lambda\nu\xi)^2 [I(2,0) - I^2(1,0)] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{여기서, } C_1 = 2\lambda\nu\xi^2$$

$$C_2 = 2\lambda(\nu^2 - \nu)\xi^2\beta^2$$

$$I(x,y) = E[\eta^{-x}e^{-\eta y}]$$

$$= \frac{\Gamma(\alpha-x)}{\Gamma(\alpha)}\theta^\alpha(\theta-y)^{x-\alpha}, \quad x > 0, y \geq 0$$

위의 Eqs. (8)~(10)을 이용하여 modified NS-RPPM의 매개변수를 추정할 수 있다. 추정해야 하는 매개변수가 6개이므로 6개의 식을 이용하여 매개변수를 추정해야 한다. NS-RPPM의 경우와 같이 집성시간 1시간의 평균, 분산, 공분산으로 세 개의 식을 구성하고 다른 집성시간에 대한 분산, 공분산을 이용하여 나머지 세 개의 식을 구성하게 된다.

Modified NS-RPPM은 NS-RPPM과 달리 각각의 강우사상마다 강우세포의 지속시간이 달라지므로 강우과정에서 다양한 크기의 강우사상을 재현할 수 있다. 또한 지속시간의 확률밀도함수가 양의 왜곡도를 가지므로 발생하는 지속시간 중 평균값보다 작은 지속시간이 큰 지속시간보다 많이 발생하지만 평균값과의 차이는 적게 나타난다. 따라서 큰 지속시간보다 많이 발생하는 작은 지속시간이 강우의 군집특성을 완화하는데 기여하게 되며 반대로 지속시간의 평균값과 큰 차이가 나는 큰 지속시간은 무강우확률의 과대추정을 완화하는데 기여하게 된다. 이러한 과정을 통해 무강우확률을 실제와 유사하게 추정하고 강우의 군집특성을 적절하게 재현하는 것으로 알려져 있다(Entekhabi *et al.*, 1989). 그러나 NS-RPPM과 modified NS-RPPM의 경우, 매개변수 개수의 증가에 따른 매개변수 최적화의 문제가 발생하게 된다. 이들 모형의 매개변수 최적화를 위해서는 두 개 이상의 집성시간을 선택하게 되는데, 선택된 두 개의 집성시간의 간격이 가까운 경우 목적함수가 평평해져(flat) 최적값이 불안정하게 나타난다(Calenda and Napolitano, 1999). 아울러, 최적해가 초기값에 민감하게 변화하여 국지해를 피하기가 어렵게 된다(Favre *et al.*, 2004). 이러한 문제를 해결하기 위해 최적값이 안정되도록 집성시간의 간격을 조절해야 하며, 다양한 초기값에 대하여 최적화를 수행한 후 적절한 최적값을 선택해야 한다.

3. 매개변수의 추정

본 장에서는 2장에서 설명한 RPPM, NS-RPPM, modified NS-RPPM의 매개변수를 추정해 보았다. 매개변수 추정을 위한 관측자료로 기상청 강릉관측소의

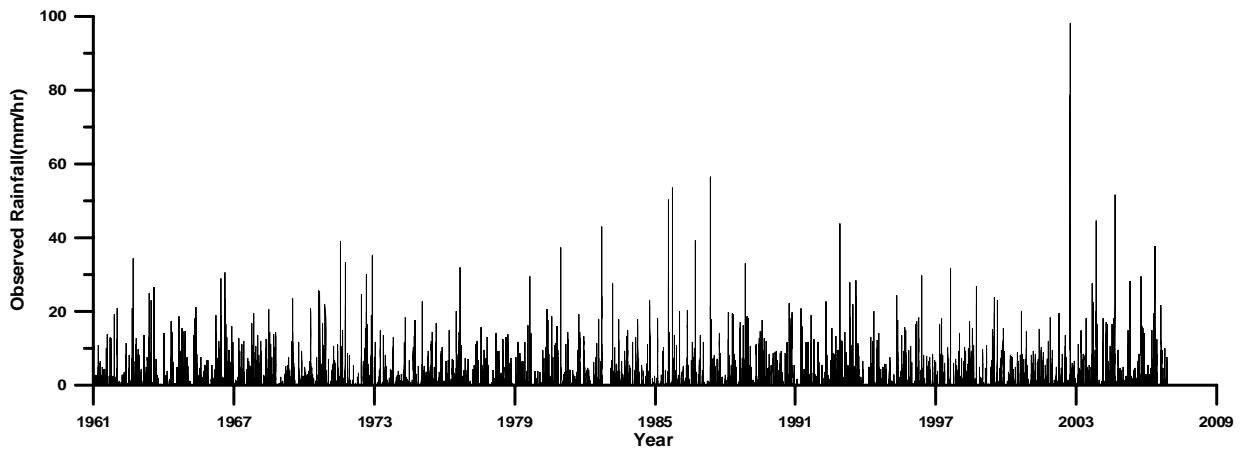


Fig. 1. Hourly Rainfall Data during Rainy Season in 1961-2006 of Gangneung Station

Table 1. Statistics for Hourly Rainfall Data of Gangneung Station

Hours of aggregation	1	6	12	24
Mean	0.2920	1.7521	3.5043	7.0085
Variance	2.5209	59.7966	185.5231	543.9997
Covariance(lag-1)	1.8194	30.6333	72.5632	106.5709

1961~2006년 우기(6~9월) 시강우자료(Fig. 1)를 이용하였다. 서론에서 설명한 바와 같이 강우에 의한 홍수나 토사의 발생은 주로 극치강우에 의해 발생되므로 본 연구에서는 강우가 집중되는 우기만의 자료를 이용하였다. 집계시간에 따른 강우자료의 통계치는 Table 1과 같다.

Table 1의 통계치를 이용하여 모형의 매개변수를 추정하였다. 일반적으로 강우의 집계시간(지속기간)을 구분할 경우, 10분, 30분, 1시간, 2시간, 3시간, 6시간, 12시간, 24시간을 사용하는 것이 보통이다. 본 연구에서는 시강우자료를 이용하였으므로 10분, 30분의 집계시간을 제외하였으며, 2.3절에서 설명한 바와 같이 선택된 두 개의 집계시간의 간격이 가까운 경우 목적함수가 평평해져(flat) 최적값이 불안정하게 나타나는 것을 고려하여 2, 3시간의 집계시간을 제외하였다. NSRPM과 modified NSRPM의 매개변수 추정 시 Calenda and Napolitano(1999)에 근거하여 매개변수의 범위(Table 2)를 설정하였다. 또한 매개변수 추정을 위한 집계시간을 변화시키며 Eq. (11)의 목적함수에 대하여 매개변수를

추정하였다. 아울러 국지해를 피하기 위해 각 매개변수의 구간을 5개의 등구간으로 나누어 각 구간의 시작값(Table 3)을 초기값으로 최적화를 수행한 후 최소의 오차를 가지는 최적값을 선택하였다. 매개변수 최적화의 결과를 Table 4부터 Table 6에 정리하였다. NSRPM과 modified NSRPM의 경우, 2장에서 설명한 바와 같이 매개변수의 추정을 위해 12개의 통계치 중 각각 5개, 6개의 통계치를 이용하여 식을 구성하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 매개변수 추정을 위해 사용될 수 있는 집계시간별 통계치의 경우를 각각 7개, 9개의 set으로 구분하여 최적화를 수행하였다. Table 5와 Table 6을 보면 최적화에 이용한 집계시간과 통계치가 변화함에 따라 최적화된 매개변수의 값이 다양하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

$$\text{Minimize } F = \sum_i \left[\frac{M_i}{\widehat{M}_i} - 1 \right]^2 \quad (11)$$

M_i : theoretical moment

\widehat{M}_i : observed moment

Table 2. Upper and Lower Limits for the Parameter

Parameter	$\lambda(h^{-1})$	ν	$\beta(h^{-1})$	$\eta(h^{-1})$	$\xi(mm/h)$
Minimum value	0.001	2.0	0.01	0.1	0.3
Maximum value	0.050	100.0	0.50	5.0	15.0

Table 3. 5 Initial Value of Each Parameter

Parameter	$\lambda(h^{-1})$	ν	$\beta(h^{-1b})$	$\eta(h^{-1})$	$\xi(mm/h)$
1st initial value	0.0010	2.0	0.010	0.10	0.30
2nd initial value	0.0108	21.6	0.108	1.08	3.24
3rd initial value	0.0206	41.2	0.206	2.06	6.18
4th initial value	0.0304	60.8	0.304	3.04	9.12
5th initial value	0.0402	80.4	0.402	4.02	12.06

Table 4. Estimated Parameters of RPPM

Parameter	λ	μ	η
Value	0.0294	5.0823	1.9565

Table 5. Estimated Parameters of NS-RPPM

Set	Moment	Hours of aggregation				Parameter				
		1	6	12	24	λ	ν	β	η	ξ
I	Mean	O				0.0065	70.494	0.1602	5.0000	3.1652
	Var	O	O							
	Cov	O	O							
II	Mean	O				0.0056	52.456	0.1243	2.8094	2.7949
	Var	O		O						
	Cov	O		O						
III	Mean	O				0.0055	82.865	0.1315	5.0000	3.2163
	Var	O			O					
	Cov	O			O					
IV	Mean	O				0.0059	70.754	0.1400	4.5764	3.1947
	Var	O	O	O						
	Cov	O								
V	Mean	O				0.0047	35.686	0.0882	1.6693	2.9210
	Var	O		O	O					
	Cov	O								
VI	Mean	O				0.0057	27.986	0.1116	1.5290	2.8202
	Var	O	O	O						
	Cov	O	O	O						
VII	Mean	O				0.0055	78.418	0.1306	5.0000	3.3671
	Var	O		O	O					
	Cov	O		O	O					

※ In cases of VI, VII, lag-1 auto correlation coefficient(=Cov/Var) for each aggregation hours are used

Table 6. Estimated Parameters of Modified NS-RPPM

Set	Moment	Hours of aggregation				Parameter					
		1	6	12	24	λ	ν	β	θ	α	ξ
I	Mean	O				0.0101	20.039	0.1298	1.6692	4.0051	2.6919
	Var	O	O	O							
	Cov	O	O								
II	Mean	O				0.0103	19.232	0.1352	1.7986	4.0636	2.6187
	Var	O	O		O						
	Cov	O	O								
III	Mean	O				0.0098	19.112	0.1076	1.6979	3.9099	2.8374
	Var	O	O								
	Cov	O	O	O							
IV	Mean	O				0.0104	18.650	0.1259	1.8297	4.0393	2.6576
	Var	O	O								
	Cov	O	O		O						
V	Mean	O				0.0101	10.132	0.0758	2.5896	3.8760	3.4065
	Var	O		O	O						
	Cov	O		O							
VI	Mean	O				0.0102	19.851	0.1117	1.3996	3.6451	2.9065
	Var	O		O							
	Cov	O		O	O						
VII	Mean	O				0.0108	19.128	0.1641	1.8978	4.3106	2.5197
	Var	O	O	O	O						
	Cov	O									
VIII	Mean	O				0.0102	19.355	0.1152	1.6503	3.7328	2.6632
	Var	O									
	Cov	O	O	O	O						
IX	Mean	O				0.0101	19.332	0.1118	1.4430	3.6674	2.9289
	Var	O	O	O	O						
	Cov	O	O	O	O						

※ In case of IX, lag-1 auto correlation coefficient(=Cov/Var) for each aggregation hours are used

4. 강우모의를 통한 최적모형의 결정

본 장에서는 본 연구에서 고려한 강우모형 및 Table 4, 5, 6에서와 같이 사용되는 통계치에 따라 다르게 추정된 매개변수를 이용하여 강우모의를 수행한 후 관측 강우를 적절하게 재현해 주는 모형 및 매개변수 추정을 위한 통계치의 set을 선정하고자 한다. 이를 위하여 모의된 강우자료에 대한 통계특성과 강우의 발생특성을 비교하였다. 먼저, 각 매개변수를 이용하여 관측강우와 같은 기간인 46년의 시강우자료를 생성한 후 각 집계시

간에 대한 통계치를 비교하였다(Table 7).

Table 7을 보면 RPPM의 경우, 집계시간 1시간에 대한 통계치(평균, 분산, 1시간 지체 공분산)는 잘 재현하지만 그 이후(6, 12, 24시간)의 통계치는 차이를 보이며 특히 공분산의 경우 극단적으로 과소추정되는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 2.1절에서 설명한 RPPM모형의 단점을 단적으로 보여주는 예라고 할 수 있다. 반면, NS-RPPM과 modified NS-RPPM의 경우, NS-RPPM의 set II, III, modified NS-RPPM의 set IV, VI이 여러 집계시간의 통계치를 15%의 오차 이내로 적

절하게 재현하고 있으며 대부분의 통계치가 10% 이내의 오차를 보이는 것을 알 수 있다.

다음으로, 모의된 강우에 대한 강우발생특성 및 강우강도를 비교하였다. 관측강우와 집성시간의 set에 따라 모의된 강우의 발생특성 및 그 크기를 관측강우의 발생특성 및 강우강도와 비교하였다(Table 8). 강우강도의

경우 비교적 작은 강우강도를 가지는 강우의 개수를 비교하기 위해 5 mm 미만의 강우의 개수를 비교하였으며 다음으로 강우강도를 등구간(20, 40, 60 mm)으로 나누어 그 강도를 초과하는 강우의 개수를 비교하였다.

Table 8을 보면 강우발생과 강우강도의 경우 모두에서 modified NS-RPPM이 좋은 결과를 주는 것을 알

Table 7. Comparison of Statistics between Observed and Generated Rainfall Data

Model	Set	Mean (1hr)	Var (1hr)	Cov (1hr)	Var (6hr)	Cov (6hr)	Var (12hr)	Cov (12hr)	Var (24hr)	Cov (24hr)
Observed		0.292	2.521	1.819	59.80	30.63	185.5	72.56	544.0	106.6
RPPM		0.301 (3%)	2.879 (14%)	1.913 (5%)	51.54 (14%)	11.14 (64%)	127.9 (31%)	10.28 (86%)	280.1 (49%)	7.2 (93%)
NS-RPPM	I	0.254 (13%)	1.937 (23%)	1.368 (25%)	46.42 (22%)	22.22 (27%)	141.5 (24%)	41.56 (43%)	368.3 (32%)	56.3 (47%)
	II	0.301 (3%)	2.531 (0%)	1.703 (6%)	56.93 (5%)	30.55 (0%)	182.9 (1%)	62.12 (14%)	488.4 (10%)	90.6 (15%)
	III	0.296 (1%)	2.476 (2%)	1.822 (0%)	62.42 (4%)	33.16 (8%)	201.5 (9%)	66.00 (9%)	542.6 (0%)	84.1 (21%)
	IV	0.249 (15%)	2.032 (19%)	1.469 (19%)	48.65 (19%)	26.17 (15%)	153.5 (17%)	52.30 (28%)	417.2 (23%)	71.6 (33%)
	V	0.263 (10%)	2.212 (12%)	1.302 (28%)	43.50 (27%)	24.70 (19%)	139.1 (25%)	60.80 (16%)	396.8 (27%)	116.4 (9%)
	VI	0.274 (6%)	2.239 (11%)	1.439 (21%)	46.38 (22%)	25.36 (17%)	145.5 (22%)	57.71 (20%)	405.6 (25%)	90.5 (15%)
	VII	0.262 (10%)	2.082 (17%)	1.497 (18%)	51.79 (13%)	28.47 (7%)	166.7 (10%)	57.41 (21%)	455.0 (16%)	78.7 (26%)
Modified NS-RPPM	I	0.249 (15%)	1.977 (22%)	1.262 (31%)	41.62 (30%)	21.94 (28%)	126.7 (32%)	50.94 (30%)	373.0 (31%)	69.8 (35%)
	II	0.309 (6%)	3.888 (54%)	2.764 (52%)	91.48 (53%)	50.59 (65%)	288.9 (56%)	112.7 (55%)	803.9 (48%)	264.9 (148%)
	III	0.267 (9%)	1.903 (25%)	1.178 (35%)	37.91 (37%)	19.61 (36%)	117.5 (37%)	43.33 (40%)	319.4 (41%)	69.2 (35%)
	IV	0.301 (3%)	2.760 (9%)	1.777 (2%)	56.80 (5%)	29.93 (2%)	171.3 (8%)	63.13 (13%)	472.0 (13%)	102.3 (4%)
	V	0.303 (4%)	2.340 (7%)	1.501 (17%)	47.32 (21%)	25.44 (17%)	147.5 (20%)	63.20 (13%)	399.6 (27%)	142.4 (34%)
	VI	0.313 (7%)	2.845 (13%)	1.775 (2%)	58.21 (3%)	31.79 (4%)	183.3 (1%)	71.93 (1%)	524.7 (4%)	122.4 (15%)
	VII	0.259 (11%)	2.335 (7%)	1.423 (22%)	45.30 (24%)	20.46 (33%)	133.2 (28%)	42.43 (42%)	354.4 (35%)	57.4 (46%)
	VIII	0.294 (1%)	2.198 (13%)	1.363 (25%)	44.58 (25%)	23.22 (24%)	132.1 (29%)	53.52 (26%)	364.4 (33%)	90.1 (15%)
	IX	0.298 (2%)	2.520 (0%)	1.532 (16%)	50.81 (15%)	28.08 (8%)	156.9 (15%)	64.60 (11%)	442.1 (19%)	108.4 (2%)

※ The values in the blanks show the error ratio of observed to generated statistics

Table 8. Comparison of Characteristics on Rainfall Occurrence and Rainfall Intensity between Observed and Generated Rainfall Data

Model	Set	Rainfall occur	Rainfall Intensity			
			< 5 mm	> 20 mm	> 40 mm	> 60 mm
Observed		18225	16122	123	18	5
RPPM		9607(47%)	6807(58%)	140(14%)	6(67%)	0(100%)
NS-RPPM	I	13802(24%)	11755(27%)	82(33%)	1(94%)	0(100%)
	II	14787(19%)	12373(23%)	144(17%)	5(72%)	0(100%)
	III	15152(17%)	12752(21%)	140(14%)	2(89%)	0(100%)
	IV	13108(28%)	11104(31%)	105(15%)	6(67%)	1(80%)
	V	12961(29%)	10876(33%)	112(9%)	6(67%)	3(40%)
	VI	13183(28%)	10974(32%)	123(0%)	4(78%)	0(100%)
	VII	13988(23%)	11885(26%)	107(13%)	2(89%)	0(100%)
Modified NS-RPPM	I	15802(13%)	14065(13%)	94(24%)	7(61%)	2(60%)
	II	16549(9%)	14351(11%)	172(40%)	43(139%)	22(340%)
	III	17025(7%)	15119(6%)	95(23%)	7(61%)	0(100%)
	IV	17236(5%)	15056(7%)	154(25%)	30(67%)	3(40%)
	V	16898(7%)	14612(9%)	110(11%)	10(44%)	1(80%)
	VI	18552(2%)	16319(1%)	168(37%)	26(44%)	6(20%)
	VII	15444(15%)	13623(16%)	119(3%)	23(28%)	4(20%)
	VIII	18304(0%)	16196(0%)	109(11%)	12(33%)	1(80%)
	IX	18110(1%)	16060(0%)	137(11%)	20(11%)	2(60%)

※ The values in the blanks show the error ratio of observed to generated rainfall characteristics

수 있다. Modified NS-RPPM set IV, VI의 경우, 20, 40, 60 mm를 초과하는 강우의 개수에서 나타나는 다소 큰 오차(약 20~60%)는 초과치의 적은 개수에 의해 기인하는 것으로 판단된다.

마지막으로, Table 7에서 관측강우의 통계치를 비교적 잘 재현해 주는 것으로 나타난 NS-RPPM의 set II, III과 modified NS-RPPM의 set IV, VI에 대하여 각 강우사상의 총 강우량, 강우기간, 강우사상 간의 간격을 누가확률밀도함수(cdf)를 이용하여 관측강우와 비교해 보았다(Fig. 2). 또한 각 특성치의 최대값과 상위 10%의 평균을 Table 9에서 비교하였다. 이 때 독립호우사상 분리를 위한 무강우시간으로 12시간을 사용하였다. 이동률과 정상만(1991)은 Restrepo and Eagleson(1982)이 제안한 방법을 이용하여 강릉관측소 우기(6~9월) 시강우자료의 독립호우사상 분리를 위한 무강우시간을 12시간으로 산정한 바 있다.

Fig. 2와 Table 9를 보면 modified NS-RPPM이 NS-RPPM과 비교하여 관측치를 잘 재현하는 것을 알 수 있다. 특히, modified NS-RPPM이 대규모 강우사상의 재현에 있어서 NS-RPPM보다 월등한 것을 알 수

있다. 비록, 강우기간의 경우 NS-RPPM이 최대값 및 상위 10% 평균을 잘 재현하고 있지만 총 강우량 및 강우사상 간의 간격의 경우에는 매우 큰 오차(약 50~150%)를 가지는 것을 알 수 있다.

이상의 결과를 종합해 볼 때, NS-RPPM set II, III과 modified NS-RPPM의 Set IV, VI가 관측치의 집성 시간에 따른 통계치를 비교적 잘 재현해 주는 것을 알 수 있다. 하지만 NS-RPPM set II, III의 경우, 관측강우에 비하여 강우발생의 개수가 너무 적게 나타나며 큰 강도를 가지는 강우를 적절하게 재현하지 못한다. 이는 NS-RPPM의 모의강우가 관측강우의 군집 특성과 극치 강우를 적절하게 재현하지 못한다는 것을 의미한다. 이러한 사실은 Fig. 3에서도 확인할 수 있다. 반면, modified NS-RPPM의 set IV, VI의 경우, NS-RPPM set II, III의 결과와 비교하여 관측강우와 가장 유사한 군집특성을 보이며 큰 강도를 가지는 강우를 적절하게 재현하는 것을 알 수 있다. 비록, 적은 강우량을 가지는 강우사상의 재현에 있어서 관측치와 다소 차이가 있으나(Fig. 2) 이 또한 NS-RPPM set II, III의 결과와 비교하여 관측치와 가장 유사하며 아울러 이러한 오차는

대규모의 강우사상이 결정적인 역할을 하는 홍수, 산사태 등 자연재해의 발생에 유의한 영향을 미치지 않을

것으로 판단된다.

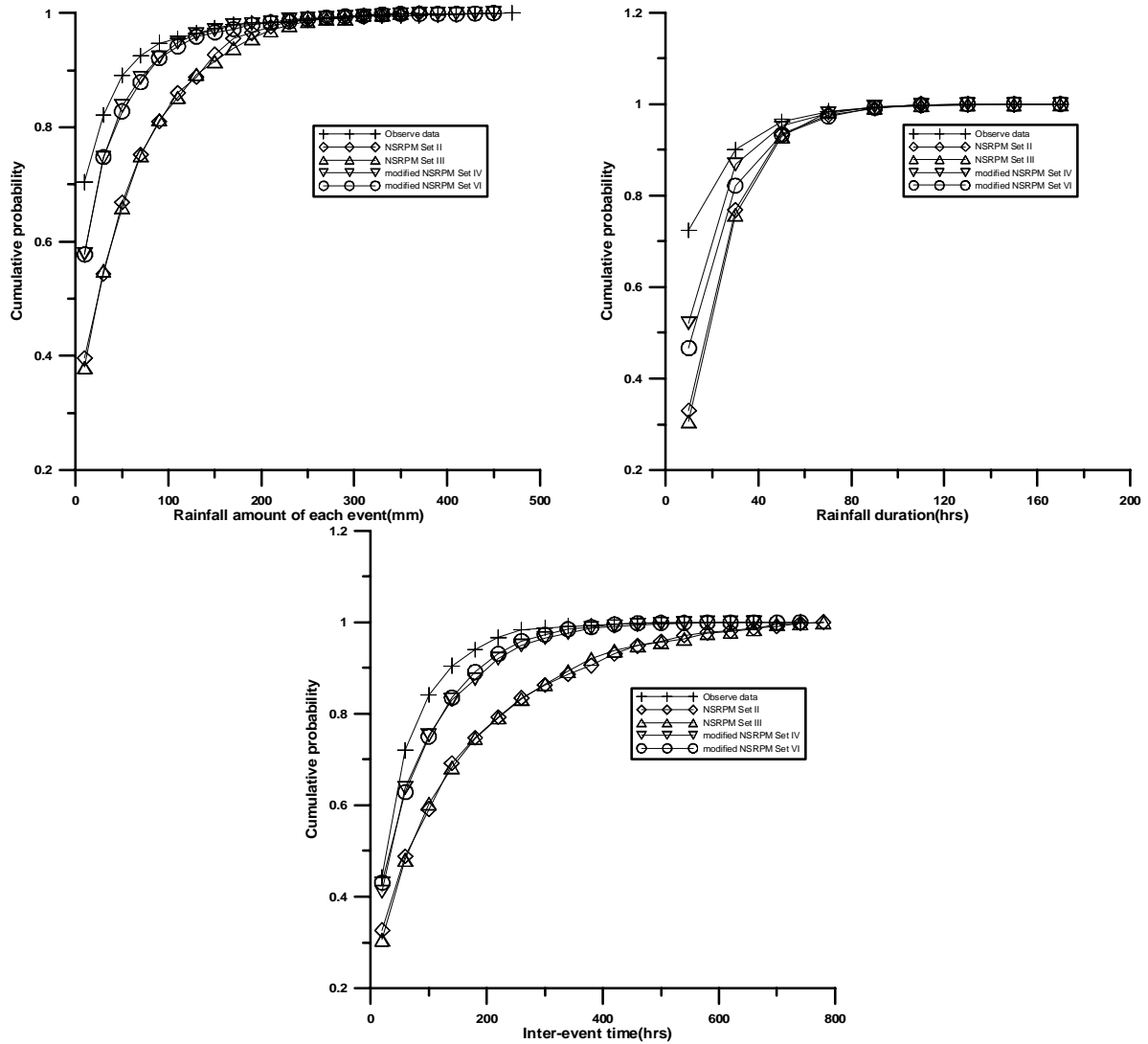


Fig. 2. Comparison of Rainfall Amount, Duration and Inter-event Time

Table 9. Maximum and Upper 10% Mean Value of Rainfall Amount, Duration and Inter-event Time

Model	Set	Upper	Rainfall amount(mm)	Duration(hrs)	Inter-event time(hrs)
Observed		Max.	897.5	179.0	740.0
		10% mean	147.6	63.3	239.0
NS-RPPM	II	Max.	369.8(59%)	114.0(36%)	1250.0(69%)
		10% mean	196.0(33%)	71.2(12%)	560.6(134%)
	III	Max.	358.2(60%)	167.0(7%)	1504.0(103%)
		10% mean	206.2(40%)	71.5(13%)	605.4(153%)
Modified NS-RPPM	IV	Max.	670.2(25%)	127.0(29%)	655.0(11%)
		10% mean	160.7(9%)	65.2(3%)	310.0(30%)
	VI	Max.	774.1(14%)	137.0(23%)	729.0(1%)
		10% mean	171.0(16%)	72.0(14%)	291.0(22%)

※ The values in the blanks show the error ratio of observed to generated characteristics

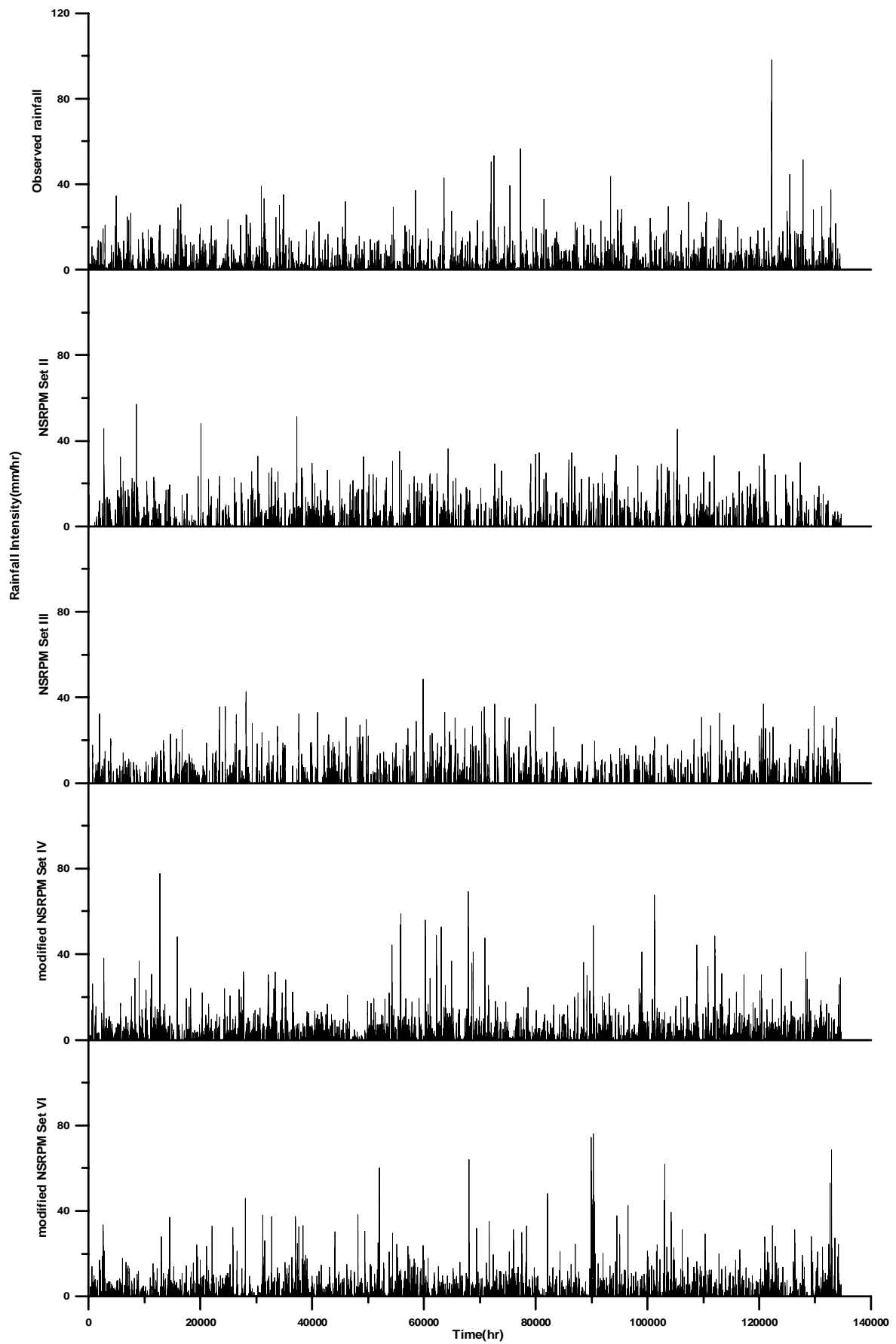


Fig. 3. Observed and Generated Hourly Rainfall Data

5. 결 론

본 연구에서는 관측강우의 통계특성 및 발생특성을 적절하게 재현해 줄 수 있는 모형을 선정하고자 하였다. 이를 위해 점강우모형인 RPPM, NS-RPPM, modified NS-RPPM을 고려하여 모의자료에 대한 통계 분석을 수행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 모의자료에 대한 통계치 비교 결과, NS-RPPM의 경우, 매개변수 추정을 위해 집성시간 1시간과 12시간의 통계치를 이용한 set II와 집성시간 1시간과 24시간의 통계치 이용한 set III, modified NS-RPPM의 경우, 매개변수 추정을 위해 집성시간 1시간과 6시간, 24시간의 통계치를 이용한 set IV와 집성시간 1시간과 12시간, 24시간의 통계치를 이용한 set VI가 여러 집성시간의 통계치를 적절하게 재현하였다.
- 2) 모의자료의 발생특성을 비교해 본 결과, 매개변수 추정을 위해 집성시간 1시간과 6시간, 24시간의 통계치를 이용한 modified NS-RPPM set IV와 집성시간 1시간과 12시간, 24시간의 통계치를 이용한 modified NS-RPPM set VI가 가장 좋은 결과를 보였다. 특히, 강우와 관련된 자연재해의 발생에 큰 영향을 주는 큰 강도를 가지는 강우의 개수가 관측치와 가장 유사하게 나타났다.
- 3) 모의된 강우사상의 총 강우량, 강우기간, 강우사상간의 간격을 관측강우와 비교해본 결과 또한, 매개변수 추정을 위해 집성시간 1시간과 6시간, 24시간의 통계치를 이용한 modified NS-RPPM set IV와 집성시간 1시간과 12시간, 24시간의 통계치를 이용한 modified NS-RPPM set VI가 가장 좋은 결과를 보였다. 이 경우 적은 강우량을 가지는 강우사상의 재현에 있어서 관측치와 다소 차이가 있으나 이는 대규모의 강우사상이 결정적인 역할을 하는 자연재해의 발생에 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

본 연구의 결과를 종합해 볼 때, modified NS-RPPM(set IV, VI)이 강우의 통계특성 및 균집특성을 가장 적절하게 재현해 주는 것을 알 수 있다. 또한 본 연구의 결과는 대상지점으로 이용된 강릉관측소에 국한된 것으로서 강우의 통계특성 및 발생특성이 다른 지점의 경우 그 특성을 적절하게 재현해 주는 모형을 새롭게 선정해야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(내배수 홍수분담 최적화 기술개발)과 학술진흥재단(KRF-2007-313-D00818)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 금종호, 안재현, 김중훈, 윤용남 (2001). "점강우모형 NSRPM의 매개변수 추정." **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 206-211.
- 박상덕 (2002). "태풍 루사로 인한 홍수특성과 대책." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, Vol. 35, No. 6, pp. 36-47.
- 신현석, 강두기, 최영돈, 갈병석 (2007). "SWAT모형을 이용한 임하댐 유역 토사 유출 성향 분석 연구." **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1920-1924.
- 유철상, 김대하 (2006). "구형필스모형을 이용한 가뭄사상의 평가." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, Vol. 39, No. 4, pp. 373-382.
- 유철상, 김남원, 정광식 (2002). "점강우모형과 강우강도-지속기간-생기빈도 해석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, Vol. 34, No. 6, pp. 577-586.
- 이동률, 정상만 (1991). "한강유역 강우의 시·공간적 특성 조사연구-무강우시간에 의해 분리된 각 독립호우들의 분석 중심-" **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 382-385.
- 이수곤 (2002). "태풍 루사에 의한 피해현황 및 대책방안(산사태)." **대한토목학회지**, 대한토목학회, Vol. 50, No. 10, pp. 40-49.
- Austin, S. A. (1994). *Grand Canyon: Monument to catastrophe*, Institute for Creation Research, California, pp. 83-110.
- Avanzi, G. D., Giannecchini, R., and Puccinelli, A. (2004). "The Influence of the Geological and Geomorphological Settings on Shallow Landslides. An Example in a Temperate Climate Environment: the June 19, 1996 Event in Northwestern Tuscany(Italy)." *Engineering Geology*, Vol. 73, pp. 215-228.
- Calcaterra, D. and Santo, A. (2004). "The January 10, 1997 Pozzano Landslides, Sorrento Peninsula, Italy." *Engineering Geology*, Vol. 75, pp. 181-200.

- Calenda, G. and Napolitano, F. (1999). "Parameter Estimation of Neyman-Scott Processes for Temporal Point Process Simulation." *Journal of Hydrology*, Vol. 225, pp. 45-66.
- Cheng, J. D., Huang, Y. C., Wu, H. L., Yeh, J. L., and Chang, C. H. (2005). "Hydrometeorological and Landuse Attributes of Debris Flow and Debris Floods during Typhoon Toraji, July 29-30, 2001 in Central Taiwan." *Journal of Hydrology*, Vol. 306, pp. 161-173.
- Entekhabi, D., Rodriguez-Iturbe, I., and Eagleson, P. S. (1989). "Probabilistic Representation of the Temporal Rainfall by a modified Neyman-Scott Rectangular Pulse Model: Parameter Estimation and Validation." *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 2, pp. 295-302.
- Favre, A. C., Musy, A., and Morgenthaler, S. (2004). "Unbiased Parameter Estimation of the Neyman-Scott Model for Rainfall Simulation with Related Confidence Interval." *Journal of Hydrology*, Vol. 286, pp. 168-178.
- Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P., Cipolla, F., Sebastiani, C., Galli, M., and Salvati, P. (2004). "Landslides Triggered by the 23 November 2000 Rainfall Event in the Imperia Province, Western Liguria, Italy." *Engineering Geology*, Vol. 73, pp. 229-245.
- 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.
- Kirchner, J. W., Finkel, R. C., Riebe, C. S., Granger, D. E., Clayton, J. L., King, J. G., and Megahan, W. F. (2001). "Mountain Erosion over 10 yr, 10k.y., and 10 m.y. Time Scales." *Geology*, Vol. 29, No. 7, pp. 591-594.
- Meyer, G. A., Pierce, J. L., Wood, S. H., and Jull, A. J. T. (2001). "Fire, Storms, and Erosional Events in the Idaho Batholith." *Hydrological Processes*, Vol. 15, pp. 3025-3038.
- Perkins, S. (2000). "The Making of a Grand Canyon: Carving this beloved hole in the ground may not have been such a long-term project." *Science News*, Vol. 158, Iss. 14, pp. 218-220.
- Restrepo-Posada, P. J. and Eagleson, P. S. (1982). "Indenification of Independent Rainstorms." *Journal of Hydrology*, Vol. 55, pp. 303-319.
- Rodriguez-Iturbe, I., Gupta, V. K., and Waymire, E. (1984). "Scale Considerations in the Modeling of Temporal Rainfall." *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 11, pp. 1611-1619.
- Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D. R., and Isham, V. (1987). "Some Models for Rainfall Based on Stochastic Point Processes." *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. A410, No. 1839, pp. 269-288.
- Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D. R., and Isham, V. (1988). "A Point Process Model for Rainfall: Further Developments." *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. A417, No. 1853, pp. 283-298.
- Velghe, T., Troch, P. A., De Troch, F. P., and Vande Velde, J. (1994). "Evaluation of Cluster-based Rectangular Pulse Point Process Models for Rainfall." *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 10, pp. 2847-2857.

(논문번호:07-123/접수:2007.11.05/심사완료:2008.05.28)