

3변수 혼합 지수 확률밀도함수를 이용한 도시지역 강우유출수의 해석적 확률모형 개선

최대규 · 조덕준* · 한수희 · 김상단†

부경대학교 환경시스템공학부

*동서대학교 건축토목공학부

Improvement of Analytical Probabilistic Model for Urban Storm Water Simulation using 3-parameter Mixed Exponential Probability Density Function

Daegy Choi · Deok Jun Jo* · Suhee Han · Sangdan Kim†

Department of Environmental System Engineering, Pukyong National University

*Division of Architecture & Civil Engineering, Dongseo University

(Received 12 March 2008, Accepted 15 May 2008)

Abstract

In order to design storage-based non-point source management facilities, the aspect of statistical features of the entire precipitation time series should be considered since non-point source pollutions are delivered by continuous rainfall runoffs. The 3-parameter mixed exponential probability density function instead of traditional single-parameter exponential probability density function is applied to represent the probabilistic features of long-term precipitation time series and model urban stormwater runoff. Finally, probability density functions of water quality control basin overflow are derived under two extreme initial conditions. The 31-year continuous precipitation time series recorded in Busan are analyzed to show that the 3-parameter mixed exponential probability density function gives better resolution.

keywords : Analytical probabilistic model, Non-point sources, Rainfall, Urban storm water

1. 서론

도시하천 오염의 주된 원인 중 하나는 강우 시에 지표면에 쌓여있던 비점오염원이 하수관거를 통하여 이송된 후, 관거의 용량을 초과하는 유출량이 발생될 경우 고농도의 강우유출수가 하천으로 처리됨 없이 방류되는 것이다. 이와 같이 하천으로 유출되는 월류수에 의한 하천오염을 방지할 목적으로 장치형 또는 저류형 시스템이 도입되고 있다. 그러나 도시지역의 강우유출수에 대한 설계기법이 아직까지 완벽하게 정립되어 있지 않아서 그에 대한 도시배수시스템의 계획에 실무적인 어려움이 있는 실정이다(조덕준 등, 2006).

지금까지 강우-유출 제어 시스템에 관한 연구는 주로 극한 사상에 한정되어 왔으며, 이러한 연구 방향은 강우-유출 관계에 있어서 주된 관심 사항이 홍수방어에 있어 왔기 때문이다. 홍수방어를 위해 착안된 여러 강우-유출 제어 관련 연구들은 당연히 홍수 방어 시스템에는 적절하게 적용될 수 있겠으나, 이를 직접적으로 비점오염원 관리 시스템에

적용하는 것은 매우 큰 무리가 따르게 된다(김상단과 조덕준, 2007). 이는 전체 강우사상 중에서 5%미만의 강우사상만이 2년 빈도를 초과하며, 10년 빈도 강우량을 초과하는 경우는 1% 미만에 불과하다는 Guo and Urbanas(1996)의 연구만 보더라도 쉽게 짐작할 수 있다.

비점오염원의 관리 관점에서의 강우유출수의 유출은 연속된 강우의 유출로부터 발생되므로 연속강우의 유출특성에 대한 연구가 선행되어야 한다. 즉, 비점오염원 관리 시스템을 설계하기 위해서는 홍수 제어 시 극한 사상을 기반으로 설계하는 것과는 달리 전체 강우자료의 통계학적 특성이 보다 더 중요하게 고려되어야 하기 때문이다(Adams and Papa, 2000). 이와 관련된 현재까지의 연구동향을 살펴보면, 저류형 비점저감시설에 대한 월류 위험도는 연속적인 강우-유출 모의 또는 Monte Carlo 모의를 이용한 추계학적 기법에 의해 주로 연구되어왔다. 예를 들어, Loganathan and Delleur(1984)와 Loganathan 등(1985)은 각 사상별로 발생하는 강우량이 지수 확률밀도함수를 따른다는 가정 하에 도시지역의 강우유출수 제어 목적 저류지의 용량을 초과하는 확률밀도함수를 유도한 바 있으며, US EPA(1986)는 비점오염원의 관리를 위한 강우유출수의 해석을 위하여 확률론적인 기법을 도입하여 저류형 비점저감시설의 규모

† To whom correspondence should be addressed.
skim@pknu.ac.kr

를 산정하는 것에 대한 실무적인 지침서를 발간한 바 있다. 또한, Behera 등(1997)은 강우 시 도시배수시스템에서의 저류량, 방류량, 저수지 용량에 대해 확률적 해석방법을 적용하여 각 유출 제어 시설에 대한 최적규모를 결정하는 방법을 제안하였으며, 이 외에도 Guo and Adams(1999a, 1999b) 등의 연구를 통하여 도시지역 비점오염원 관리를 목적으로 하는 강우유출수의 해석적 확률모형이 개발되어 오고 있다. 이러한 일련의 연구들은 연속적인 강우사상으로부터 비점오염원을 유출시키는 강우유출수의 양과 저감시설의 운영 시 그 효과를 비교적 간단하게 살펴볼 수 있는 방법론 개발의 과정으로 평가할 수 있다.

국내 또한 같은 흐름의 연구들이 최근 이루어지고 있는데, 조덕준(2007)은 도시지역 비점오염원을 동반하는 합류식 하수관거 월류수(Combined Sewer Overflows, CSOs)의 유출고 및 유량을 비초과확률 개념에 의하여 동일 위험도 기반으로 산정하는 절차를 제시하였으며, 조덕준과 김건하(2006) 및 조덕준 등(2006, 2007)은 도시 소유역의 CSOs 특성 및 부하 추정, 초기유출 효과 및 저류지 설계방법을 구축한 후, CSOs 조절을 위한 도시배수시스템의 적정 규모를 산정하는 방법을 제안하였다. 또한, 김상단과 조덕준(2007)은 강우-유출 과정으로서 합리식에 기반을 둔 상기의 연구결과들의 단점을 극복하고자, 강우-유출 관계를 국내에서 일반적으로 적용되고 있는 SCS 유출곡선법으로 대체하여 저류형 비점저감시설의 적정크기를 설정하기 위한 유출포착곡선을 유도한 바 있다.

그러나 위에 소개된 국외 및 국내 연구들은 모두 수학적 유도과정의 복잡성을 경감시킬 목적으로 강우사건의 발생 시에 내리는 비의 양이 1변수 지수 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)를 따른다고 가정하였다. 실제 강우유출수의 해석적 확률모형의 구축 시 중요하게 고려해야 할 사항들 중 하나가 연속된 전체 강우자료의 통계학적 특성의 적절한 구현인 점을 상기하여 볼 때, 강우량이 1변수 지수 PDF를 따른다는 가정은 현상을 단순화시키

는 단점을 내포하고 있다. 국내의 실제 강우량 자료를 이용하여 적절성을 평가해 본 결과, 1변수 지수 PDF에 강우량 자료를 적합시키는 데에는 강우의 재현성이 다소 떨어지는 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 도시지역 비점오염원을 관리하기 위한 해석적 확률모형의 도입에 있어서 강우량의 PDF를 기존의 1변수 지수 PDF 대신에 3변수 혼합 지수 PDF(Foufoula-Georgiou and Lettenmaier, 1987; Georgakakos and Kavvas, 1987; Hanson et al., 1994; Milks, 1998; Smith and Schreiber, 1974)로 대체하여 적용함으로써 강우량을 보다 정밀하게 통계학적으로 표현하고자 하였으며, 이를 기반으로 하여 저류형 비점저감시설의 월류 확률과 월류고에 대한 PDF를 유도하고자 한다. 또한 기존의 1변수 지수 PDF를 이용한 경우와 3변수 지수 PDF를 이용하여 유도된 결과들을 온천천 유역의 자료에 적용하여 타당성을 살펴보고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. InterEvent Time Definition (IETD)

장기간의 강우자료를 살펴보면 수많은 0값(즉, 무강우기록)들이 존재하며 연속적으로 또는 불연속적으로 강우기록(0이 아닌 값)이 있음을 알 수 있다. 이러한 연속적인 또는 불연속적인 강우기록으로부터 각각의 개별적인 강우사상을 분리하기 위해서는 각 강우사상의 시작과 끝을 구별할 수 있는 기준이 필요하게 되는데, IETD(InterEvent Time Definition)가 이러한 기준으로써 비교적 손쉽게 적용가능하다. IETD란 장기간의 강우자료로부터 각각의 강우사상을 분리하는 최소한의 무강우시간으로 정의될 수 있다. 즉, 강우기록 사이의 무강우시간이 IETD보다 짧으면 무강우시간 전과 후의 두 개의 강우기록들은 하나의 강우사상으로 간주되며, 반대로 무강우시간이 IETD보다 길 경우 무강우시간 전과 후의 두 개의 강우기록들은 각각의 개별적인 강우사상이 된다(Fig. 1 참조).

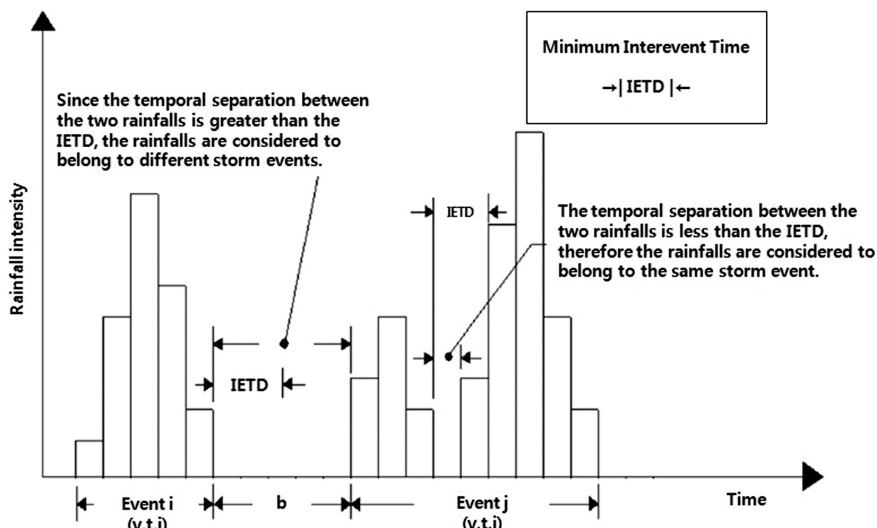


Fig. 1. Definition of IETD (after Adams and Papa, 2000).

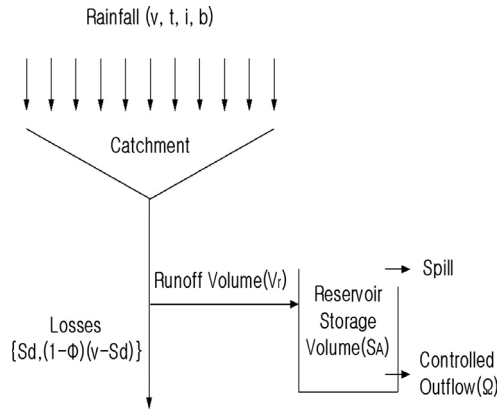


Fig. 2. Schematic model of urban drainage system.

본 연구에서는 IETD 결정에 있어 Rodriguez-Iturbe 등 (1984)이 제안한 Poisson Rectangular Pulse을 이용하여 강우를 모형화한 후, 모형의 구조와 그 모형의 구조에 합당한 매개변수를 추정하여 IETD를 결정하는 방법을 도입한 김상단과 조덕준(2007)의 연구결과를 적용하였다.

2.2. 강우 통계 특성 분석

일반적으로 입력변수들이 시스템의 확률적인 근거가 되는 분석을 위해서는 PDF로 나타낼 수 있어야 한다. 비점오염원의 관리를 위한 도시배수시스템의 경우에는 강우량, 지속시간, 평균강우강도, 무강우지속시간 등이 주로 확률적인 변수로 사용되는데(Adams and Papa, 2000), 연속강우자료에서 추출된 일련의 강우표본은 히스토그램을 이용하여 각 변수들의 상대비도, 특성치의 크기 및 범위 등에 관련된 정보를 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 현재까지의 관련된 연구들에서 강우량을 표현하기 위한 PDF로 쓰였던 1변수 지수 PDF와 동시에 본 연구에서 제시된 3변수 혼합 지수 PDF를 유도하여 비교하였다. 강우량 v 에 대한 각각의 1변수 지수 및 3변수 혼합 지수의 PDF는 다음과 같다.

1변수 지수 PDF:

$$f(V) = \zeta e^{-\zeta v} \quad v \geq 0 \tag{1}$$

여기서, 매개변수 ζ 는 $\zeta = \frac{1}{m}$ (mm^{-1})로서, 강우량 평균의 역수가 된다.

3변수 혼합 지수 PDF:

$$f(V) = \frac{\gamma}{\alpha} e^{-v/\alpha} + \frac{(1-\gamma)}{\beta} e^{-v/\beta} \quad v \geq 0 \tag{2}$$

여기서, 매개변수 α, β, γ 는 아래와 같은 관계식을 통하여 추정이 가능하다.

$$\text{평균 } m = \beta + \alpha\gamma - \beta\gamma \tag{3}$$

$$\text{분산 } \sigma^2 = -\gamma^2(\alpha + \beta)^2 + 2\gamma\alpha\beta + \beta^2 \tag{4}$$

왜곡도계수

$$C_s = (\alpha - \beta)^3 - 3\alpha\gamma^2(\alpha - \beta)^2 + 3\alpha^2\gamma(\alpha - \beta) + \beta^3 \tag{5}$$

강우지속시간 t 는 상기의 연구들과 같이 1변수 지수 PDF를 사용하였다.

$$f_T(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad t \geq 0 \tag{6}$$

여기서, λ 는 $\lambda = \frac{1}{\bar{t}}$ (h^{-1})로서, 강우지속시간 평균의 역수가 된다.

한편, 무강우 지속시간의 PDF는 IETD가 독립 강우사상으로 분리할 수 있는 최소 무강우 지속시간을 의미하기 때문에 IETD보다 작은 무강우 지속시간은 무의미하게 된다. 따라서 무강우지속시간 b 의 범위는 $b \geq IETD$ 가 되며, 그 PDF를 아래와 같이 설정하였다.

$$f_B(b) = \psi e^{-\psi(b - IETD)} \quad (b \geq IETD) \tag{7}$$

여기서, $\psi = \frac{1}{\bar{b} - IETD}$ (h^{-1})이며, \bar{b} 는 무강우 지속시간의 평균(h)이다.

2.3. 해석적 강우유출수 모의 모형에 의한 유출특성

2.3.1. 모형의 기본가정

본 절에서는 두 가지 강우량 PDF에 동일한 강우유출수 모의 모형을 적용하여 이로부터 유도되는 유출 관련 변량들의 PDF를 도출하였다. 본 연구에서 사용된 강우유출수 모의 모형은 STORM(US Army corps of Engineerings, 1974)에서 사용된 선형적인 모형을 적용하였다. 강우-유출 관계를 모식화하면 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 강우 v 에서 유출 v_r 로의 전환은 아래와 같은 과정으로 표현된다.

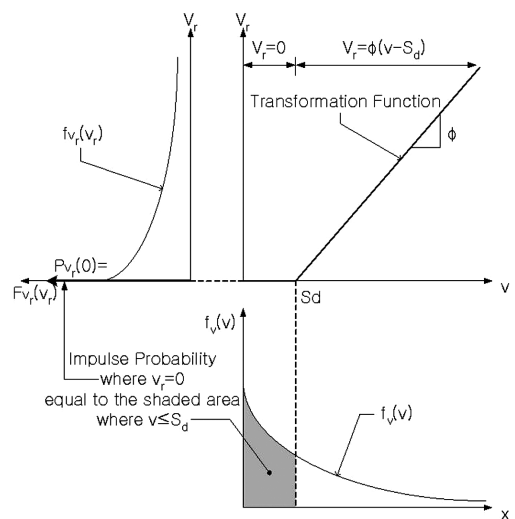


Fig. 3. Transformation of PDF of rainfall volume to PDF of runoff volume.

$$v_r = 0, \quad v \leq S_d \tag{8}$$

$$= \phi(v - S_d), \quad v > S_d$$

여기서 강우는 유출을 발생시키기 전에 지면저류량 S_d (mm)를 먼저 채운다. 지면저류량을 초과하는 강우가 발생할 때, 유출은 강우량과 지면저류량의 차이에 대한 유출계수(ϕ)의 비로 표현될 수 있다.

2.3.2. 유출량 산정

모형의 유출 과정을 동일하게 적용하였기 때문에 유출량 산정 부분에서는 동일한 가정이 적용된다. 하지만 강우량의 PDF를 다르게 두고 유출 관련 변량들의 PDF를 유도하였기 때문에 유도된 결과에 차이가 발생된다. PDF로 표현된 강우량과 식 (8)의 강우-유출변환관계를 이용하여, 유출고의 누가 확률밀도함수(Cumulative PDF, CDF) $F_{V_r}(v_r)$ 를 유도 확률밀도이론(derived probability density theory)으로부터 유도할 수 있다. Fig. 3은 강우-유출 변환 함수에 의하여 강우량의 PDF로부터 유출량의 PDF로 전환되는 과정을 보여준다.

강우유출수 모의 모형에 따라 강우사상을 발생하였을 때, 강우량이 지면저류량을 넘지 못하면 그 강우사상은 유출을 발생시키지 않을 것이다. 결과적으로, 유출이 발생하지 않을 확률은 강우량이 지면저류량을 넘지 않을 확률과 같으며, 이때의 확률은 Impulse Probability로 나타내어지고 그 크기는 Fig. 3에서 음영 처리된 면적에 해당된다. Impulse Probability는 다음과 같이 유도될 수 있다.

1변수 지수 PDF의 경우:

$$P_{V_r}(0) = \text{Prob}[V_r = 0] = \text{Prob}[V \leq S_d] \tag{9}$$

$$= \int_{v=0}^{S_d} f_V(v)dv = \int_{v=0}^{S_d} \zeta e^{-\zeta v} dv$$

$$= 1 - e^{-\zeta S_d}$$

3변수 혼합 지수 PDF의 경우:

$$P_{V_r}(0) = \text{Prob}[V_r = 0] = \text{Prob}[V \leq S_d]$$

$$= \int_{v=0}^{S_d} f_V(v)dv = \int_{v=0}^{S_d} (\gamma/\alpha)e^{-v/\alpha} + \frac{(1-\gamma)}{\beta}e^{-v/\beta} dv$$

$$= 1 - \{\gamma e^{-S_d/\alpha} + (1-\gamma)e^{-S_d/\beta}\} \tag{10}$$

강우량이 지면저류량보다 크게 될 때($v > S_d$), 유출이 발생하게 되며, 이 때의 누가확률밀도함수(CDF)는 다음과 같이 유도된다.

1변수 지수 PDF의 경우:

$$F_{V_r}(v_r) = \text{Prob}[V_r \leq v_r] = \text{Prob}(V_r = 0) + \text{Prob}\left[S_d < V \leq \frac{v_r}{\phi} + S_d\right]$$

$$= \text{Prob}[V_r = 0] + (1 - e^{-\zeta(\phi)v_r})e^{-\zeta S_d}$$

$$= 1 - e^{-\zeta[(v_r/\phi) + S_d]} \tag{11}$$

3변수 혼합 지수 PDF의 경우:

$$F_{V_r}(v_r) = \text{Prob}[V_r = v_r] = \text{Prob}(V_r \leq 0) + \text{Prob}\left[S_d < V < \frac{v_r}{\phi} + S_d\right]$$

$$= \text{Prob}[V_r = 0] + \int_{S_d}^{(v_r/\phi) + S_d} f_V(v)dv$$

$$= 1 - \gamma e^{-\frac{v_r + S_d\phi}{\phi\alpha}} + (\gamma - 1)e^{-\frac{v_r + S_d\phi}{\phi\beta}} \quad v_r > 0 \tag{12}$$

유출고의 PDF $f_{V_r}(v_r)$ 는 위의 식들을 v_r 에 대하여 각각 미분함으로써 얻어질 수 있다.

1변수 지수 PDF의 경우:

$$f_{V_r}(v_r) = \frac{d}{dv_r} F_{V_r}(v_r) = \frac{\zeta}{\phi} e^{-\zeta[(v_r/\phi) + S_d]}, \quad v_r > 0 \tag{13}$$

3변수 혼합 지수 PDF의 경우:

$$f_{V_r} = \frac{d}{dv_r} F_{V_r}(v_r) = \frac{\gamma}{\phi\alpha} e^{-\frac{v_r + S_d\phi}{\phi\alpha}} + \frac{(\gamma - 1)}{\phi\beta} e^{-\frac{v_r + S_d\phi}{\phi\beta}}, \quad v_r > 0 \tag{14}$$

이로부터 강우가 시작됐을 때 유출이 일어날 확률은 다음과 같다.

1변수 지수 PDF의 경우:

$$\text{Prob}[V > S_d] = \int_{v=S_d}^{\infty} f_V(v)dv \tag{15}$$

$$= \int_{v=S_d}^{\infty} \zeta e^{-\zeta v} dv = e^{-\zeta S_d}$$

3변수 혼합 지수 PDF의 경우:

$$\text{Prob}[V > S_d] = \int_{v=S_d}^{\infty} f_V(v)dv$$

$$= \int_{v=S_d}^{\infty} \frac{\gamma}{\alpha} e^{-v/\alpha} + \frac{(1-\gamma)}{\beta} e^{-v/\beta} dv$$

$$= \gamma e^{-S_d/\alpha} - (\gamma - 1) e^{-S_d/\beta} \tag{16}$$

2.4. 월류량 확률 및 월류량 확률밀도함수 산정

이전까지의 국내에서 논의된 비점오염원 관리를 위한 도시배수시스템에서의 유입-저류-유출관계는 Adams and Papa(2000)에서 제시된 바와 같이 강우가 진행 중에도 저류형 비점저감시설에 저류되는 양은 강우에서 유출로 전환된 양에서 방류량에 해당하는 양만큼을 제외한 부분을 고려해왔다(조덕준 등, 2006; 조덕준 등, 2007). 하지만 국내의 경우 강우가 진행 중에는 저류형 비점저감시설의 수위가 만수위가 되기 전까지는 시설로부터의 유출량은 없이 만수위가 된 이후부터 방류를 시작하는 방법으로 운영되는 것이 일반적이다. 이를 반영하여 본 연구에서는 Adams and Papa(2000)에서 제시된 도시배수시스템에서 이를 추가하여 저류형 비점저감시설로부터의 월류량의 PDF를 유도하였다.

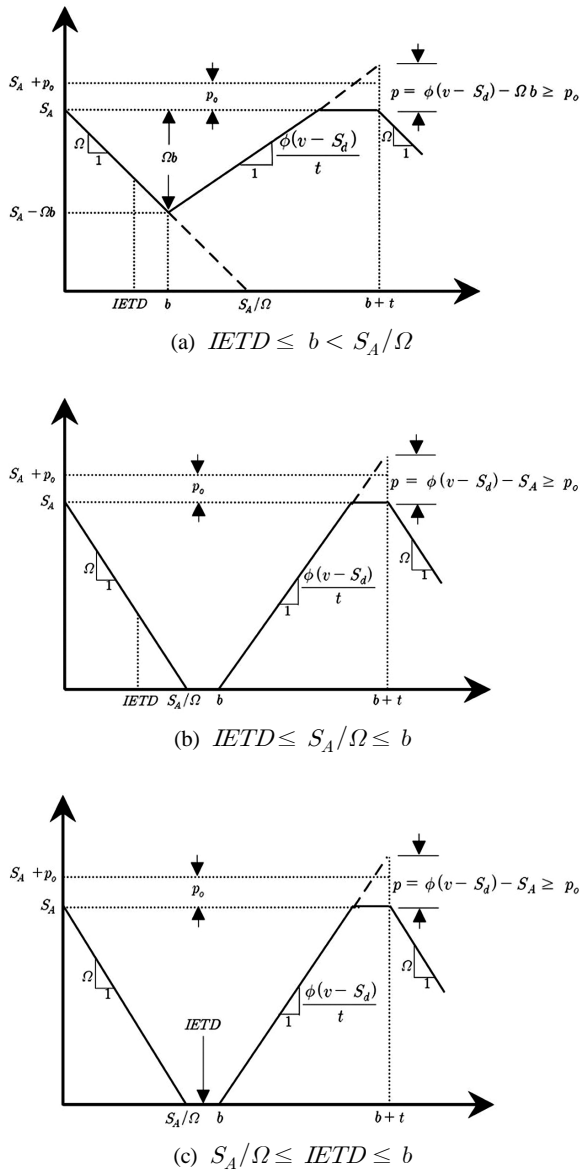


Fig. 4. Time histories of a water quality control basin.

저류형 비점저감시설로부터의 월류량 추정을 위해서는 유출이 발생되기 시작할 때의 저감시설의 초기 수위가 결정되어야 하는데, 이는 이전 강우사상에서의 유출 종료시간과 무강우시간, 현재 강우사상에서의 유출 시작시간의 함수로 표현된다. 본 연구에서는 모형의 간략화를 위하여 유출이 발생되기 시작할 때의 저류형 비점저감시설의 초기 수위를 만수위 상태라고 가정하였을 경우와 완전히 비워져 있는 경우로 나누어 월류량의 PDF를 유도하였다. 따라서

본 연구로부터 유도된 월류량은 실제 월류량과 비교할 때, 가장 월류가 많이 되는 경우와 가장 월류가 적게 되는 경우를 의미한다고 볼 수 있다.

첫 번째 경우로 i 번째 강우사상이 종료되었을 때 저류형 비점저감시설의 수위가 만수위라고 가정하여 월류량의 PDF를 유도하였다. Ω 를 저류형 비점저감시설의 방류율, S_A 를 저류형 비점저감시설의 설계용량이라고 하면, Fig. 4(a)는 $IETD \leq b < S_A/\Omega$ 일 때, Fig. 4(b)는 $IETD \leq S_A/\Omega \leq b$ 일 때, Fig. 4(c)는 무강우시간이 $S_A/\Omega \leq IETD \leq b$ 일 때의 저류형 비점저감시설의 거동을 나타낸다. Table 1에 저류형 비점저감시설에서의 임의의 월류량 p_o 이상의 월류가 발생할 경우의 조건과 그 때의 월류량을 정리하였다.

각 강우-유출사상당 임의의 월류량 P_o 이상의 월류가 발생할 확률 $Gp_1(p_o)$ 은 강우지속시간과 무강우시간, 강우량의 결합 PDF로부터 구할 수 있으며, 그에 따른 월류 확률은 Fig. 4와 Table 1로부터 결국 $IETD < S_A/\Omega$ 일 때와 $IETD \geq S_A/\Omega$ 일 때의 경우로 나누어 계산하여야 함을 알 수 있다. 강우지속시간과 무강우시간, 강우량의 결합 PDF는 다음과 같다.

1변수 지수 PDF의 경우

$$f_{V,B,T}(v,b,t) = f_v(v)f_B(b)f_T(t) = \lambda\psi\zeta e^{-\lambda t - \psi(b - IETD) - \zeta v} \tag{17}$$

3변수 혼합 지수 PDF의 경우:

$$f_{V,B,T}(v,b,t) = f_V(v)f_B(b)f_T(t) = \frac{\gamma}{\alpha}\psi\lambda e^{-v/\alpha - \psi(b - IETD) - \lambda t} + \frac{(1-\gamma)}{\beta}\psi\lambda e^{-v/\beta - \psi(b - IETD) - \lambda t} \tag{18}$$

이로부터 월류량이 p_o 이상 발생할 확률은 다음과 같다.

$IETD < S_A/\Omega$ 일 때,

$$Gp_1(p_o) = \int_{t=0}^{\infty} \int_{IETD}^{S_A/\Omega} \int_{v=(p_o + \Omega b)/\phi + S_d}^{\infty} f_{V,B,T}(v,b,t) dv db dt + \int_{t=0}^{\infty} \int_{b=S_A/\Omega}^{\infty} \int_{v=(p_o + S_A)/\phi + S_d}^{\infty} f_{V,B,T}(v,b,t) dv db dt \tag{19}$$

Table 1. Meteorological conditions resulting in a spill ($p \geq p_o$) from a water quality control basin ($s_i = S_A$)

Case	Spill volume	Duration	Interevent time	Volume
(a)	$\phi(v - S_d) - \Omega b$	$t \geq 0$	$IETD \leq b \leq S_A/\Omega$	$V > \frac{p_o + \Omega b}{\phi} + S_d$
(b)	$\phi(v - S_d) - S_A$	$t \geq 0$	$IETD \leq S_A/\Omega \leq b$	$V > \frac{p_o + S_A}{\phi} + S_d$
(c)	$\phi(v - S_d) - S_A$	$t \geq 0$	$S_A/\Omega \leq IETD \leq b$	$V > \frac{p_o + S_A}{\phi} + S_d$

$IETD \geq S_A/\Omega$ 일 때,

$$G_{p_1}(p_o) = \int_{t=0}^{\infty} \int_{b=IETD}^{\infty} \int_{v=(p_o+S_A)/\phi+S_i}^{\infty} f_{V,B,T}(v,b,t) dv db dt$$
 (20)

식 (19), (20)을 적분하면 강우-유출사상 당 임의의 월류량 p_o 이상의 월류가 발생할 확률 $G_{p_1}(p_o)$ 을 유도할 수 있으며 그에 대한 결과는 다음과 같다.

1변수 지수 PDF의 경우:

- $IETD < S_A/\Omega$ 일 때,

$$G_{p_1}(0) = \left[\frac{\psi}{\Omega} e^{-(\Omega IETD \zeta)/\phi} + \frac{\zeta}{\phi} e^{-S_A + (S_A/\Omega + IETD)\psi} \right] \times \frac{1}{\psi/\Omega + \zeta/\phi}$$
 (21)

- $IETD \geq S_A/\Omega$ 일 때,

$$G_{p_1}(0) = e^{-\frac{(p_o+S_A+S_i)\zeta}{\phi}}$$
 (22)

3변수 혼합 지수 PDF의 경우:

- $IETD < S_A/\Omega$ 일 때,

$$G_{P_1}(p_0) = \gamma e^{-S_A\psi/\Omega - \frac{p_o+S_A+S_i\phi}{\phi\alpha}} + (1-\gamma) e^{-S_A\psi/\Omega - \frac{p_o+S_A+S_i\phi}{\phi\beta}} + \frac{\phi\psi\alpha}{\phi\psi\alpha + \Omega} \gamma (1 - e^{-\frac{S_A\psi\beta}{\Omega\alpha}}) e^{-\frac{p_o+S_A+\phi S_i}{\phi\alpha}} + \frac{\phi\psi\beta}{\phi\psi\beta + \Omega} (1-\gamma) (1 - e^{-\frac{S_A}{\phi\beta} - \frac{S_A\psi}{\Omega}}) e^{-\frac{p_o+S_A}{\phi\beta}}$$
 (23)

- $IETD \geq S_A/\Omega$ 일 때,

$$= \left[\gamma\psi\lambda e^{\frac{\psi+\phi\beta IETD - p_o - S_A - S_i\phi}{\phi\alpha}} + \psi\lambda(1-\gamma) e^{\frac{\psi+\phi\beta IETD - p_o - S_A - S_i\phi}{\phi\beta}} \right] \times e^{-\frac{IETD}{\lambda}}$$
 (24)

두 번째 경우로 i 번째 강우사상의 종료 시에 저류형 비점저감시설이 완전히 비워진다는 경우이다. 이 경우에는 저류형 비점저감시설의 시간에 따른 수위계산은 매우 단순하게 된다. $i+1$ 번째 강우사상이 발생하기 전에 저류형 비점저감시설은 $t_h = 0$ 부터 $t_h = b$ 까지 비어있고 $i+1$ 번째 강

우사상이 발생 시의 저류시설의 메커니즘은 Fig. 4(c)와 같이 나타나기 때문이다. 따라서 각 강우-유출 사상당 월류량이 임의의 월류량 p_o 이상 발생할 확률은 다음과 같다.

1변수 지수 PDF의 경우:

$$G_{P_2}(0) = e^{-\frac{(p_o+S_A+S_i)\zeta}{\phi}}$$
 (25)

3변수 혼합 지수 PDF의 경우:

$$G_{P_2}(p_0) = \left[\gamma\psi\lambda e^{\frac{\psi+\phi\beta IETD - p_o - S_A - S_i\phi}{\phi\alpha}} + \psi\lambda(1-\gamma) e^{\frac{\psi+\phi\beta IETD - p_o - S_A - S_i\phi}{\phi\beta}} \right] \times e^{-\frac{IETD}{\lambda}}$$
 (26)

식 (21)~(26)에서 표현된 각 경우의 월류 확률을 월류량 p_o 에 관하여 미분하게 되면 월류량의 PDF 또한 유도가 가능함을 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 모형 매개변수

강우자료 분석을 위한 IETD는 김상단과 조덕준(2007)에서 제시한 부산시 강우자료의 IETD값에 해당하는 6시간을 적용하였으며, 그에 따른 강우자료의 통계학적 특성을 Table 2에 정리하였다. 또한 Table 3에 적용 유역인 온천천의 유역 특성에 관련된 모형의 매개변수를 수록하였다. 부산 광역시에 위치한 도시하천인 온천천 유역은 현재 차집관거의 차집용량이 계획오수량(1Q)으로 제한되어 강우 시에 하천이 심하게 오염되는 여건에 있으며 일상에서 이를 쉽게 경험할 수 있다. 총 연장 약 12.7 km 중에서 수영강과 합류되는 하류 3.8 km의 정비를 완료하였고 상류 1.9 km를 제외한 동래역(지하철1호선)에서 구서역에 이르는 중상류 7 km를 자연형 하천으로 복원하고 다양한 휴식 및 편의시설을 2010년까지 완료하려는 계획을 수립하였다. 이러한 정비사업이 완료되면 온천천은 경관성이 크게 개선되고 접근성이 좋아지며 특히, 주민의 휴게 및 산책, 운동, 문화활동 등 자연형 하천에서의 활동을 통한 생활의 질이 크게 개선될 것으로 기대된다. 그러나 부산지역의 대부분의 하천과 마찬가지로 생활오수 정도를 차집하고 있어서 우천 시에는 유역에 산재한 비점오염원이 강우와 함께 대부분 하천으로 유입하게 되므로 강우에 의하여 유량이 비교적 풍부한 우기를 중심으로 호우기에는 하천의 수질이 심하게 악화되는 문제를 그대로 내포하고 있는 실정이다. 국내의 경우 우기가 약 3개월 정도이고 건기를 포함하여 일 년에

Table 2. Hydrometeorologic parameters

1-parameter exponential PDFs		3-parameter mixed exponential PDF	
Parameter	Value	Parameter	Value
ζ	0.049	α	53.6207
λ	0.097	β	5.6244
ψ	0.011	γ	0.3066

Table 3. Physical parameters

Items	Characteristics	
Characteristics of study area	Runoff ratio (ϕ)	0.6
	Detention depth (S_d)	2.5 mm
	Depression storage loss (S_t)	2.5 mm
	Control outflow rate (Ω)	0.1 mm/hr
Runoff characteristics	Average runoff a event (v_r)	5.935 mm/event
	Annual average runoff (R)	454.028 mm/yr
	$Prob[V > S_d]$	0.580
	Decade times of runoff	444
	Annual times of runoff	44.4

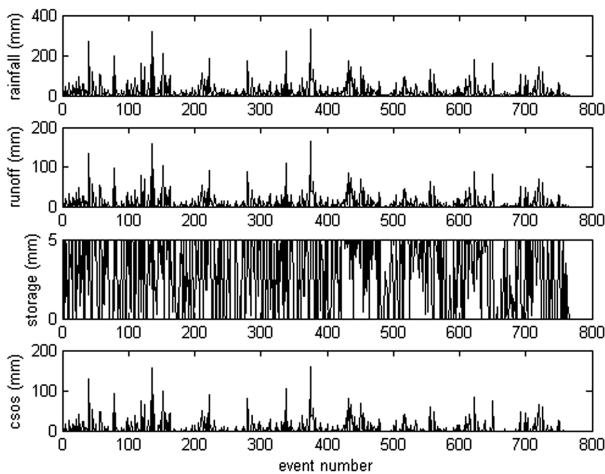


Fig. 5. Time-series Rainfall-Runoff-Storage-CSOs.

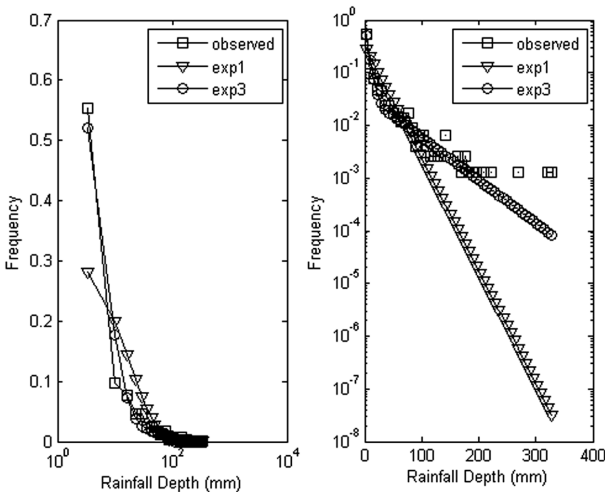


Fig. 6. PDF of Rainfall volume.

약 80회 정도의 강우가 발생하고 있으며, 일회 강우지속시간도 약 11시간임을 고려할 때 이에 대한 대책이 없이는 친수 자연형 하천으로의 기능이 크게 저하되는 것을 막을 수 없게 된다. 따라서 우천 시에 하천의 오염을 최소화하기 위한 근본적인 대책 수립이 시급한 하천 중 하나이다.

Fig. 5는 실제 강우사상을 본 연구의 유출모형에 적용하여 계산된 유출량(runoff), 저류형 비점저감시설의 저류량(storage) 및 월류량(csos)를 도시하고 있다.

3.2. 적용결과분석

Fig. 6은 observed는 관측된 강우량에 대한 PDF를, exp1는 관측된 강우량을 1변수 지수 PDF에 적합시킨 결과를, exp3는 관측된 강우량을 3변수 혼합 지수 PDF에 적합시킨 결과를 각각 보여주고 있다. Fig. 6으로부터 1변수 지수 PDF보다는 3변수 지수 PDF가 실제 강우량의 확률적인 거동을 보다 잘 재현하고 있음을 살펴볼 수 있다. 이 때, 강우가 적은 경우의 빈도분포와 강우가 많은 경우의 빈도분포를 보다 잘 비교하기 위하여 Fig. 6을 산술 축과 대수 축으로 나누어 도시하였으며, 이후의 그림들 또한 비교를 위하여 산술 축과 대수 축으로 도시한 결과를 함께 수록하였다.

Fig. 7(a)는 강우 초기에 저류형 비점저감시설이 가득 채워졌다는 가정 하에 유도된 월류량 PDF를 보여주고 있다. Fig. 7(a)로부터 강우량의 PDF로서 1변수 지수 PDF보다는 3변수 혼합 지수 PDF를 사용하여 월류량의 PDF를 해석적으로 유도한 경우가 수치적으로 모의된 월류량의 확률적인 거동을 보다 잘 재현하고 있으며, 강우 초기 저류형 비점저감시설이 비워져 있다는 가정 하에 월류량의 PDF를 표현한 Fig. 7(b)의 경우에도 같은 결과가 도출됨을 알 수 있다. 특히, 강우 초기 저류형 비점저감시설의 저류량에 관계없이 큰 강우사상이 발생할 경우에 발생하는 월류량의 경우에는 3변수 혼합 지수 PDF를 이용하는 경우가 실제 수치적으로 모의된 자료의 특성을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8(a)와 (b)는 1변수 지수 PDF와 3변수 혼합 지수 PDF를 각각 이용하여 월류량의 PDF를 유도한 경우를 비교한 것으로 어떤 경우가 수치적으로 모의된 월류량 자료를 잘 재현하고 있는가를 보여주고 있다. 즉, 본 연구의 경우에는 월류량에 대한 PDF를 해석적으로 유도하기 위하여 강우 초기에 저류형 비점저감시설이 모두 채워진 경우와 완전히 비워진 경우를 각각 적용하였으므로, 모형이 적절하게 현실을 반영하고 있음을 보여주기 위해서는 실제 월류량의 확률적인 거동이 가정된 두 가지 경우에서 각각 유도된 범위에서 움직여야한다. Fig. 8(a)의 1변수 지수 PDF를 이용하여 강우량을 적합시킨 경우에는 월류량이 비교적 작은 경우에도 실제 수치 모의된 월류량의 확률곡선이 유도된 두 곡선의 범위를 벗어나고 있으며, 월류량이 큰 경우에는 모의된 곡선이 실제 월류량의 거동을 전혀 재현하고 있지 못함을 알 수 있다. 이에 비하여 Fig. 8(b)의 3변수

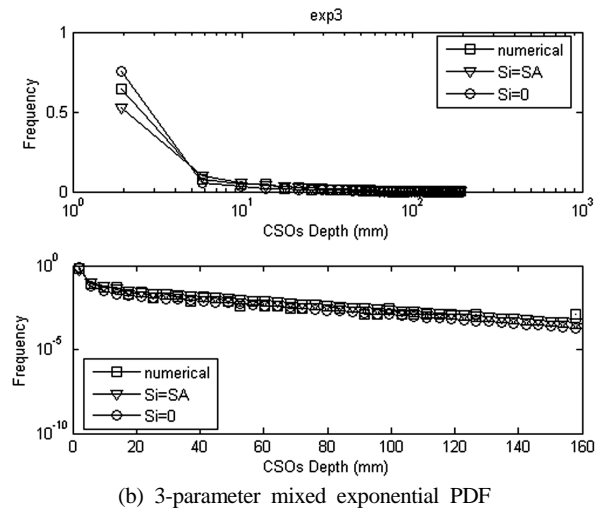
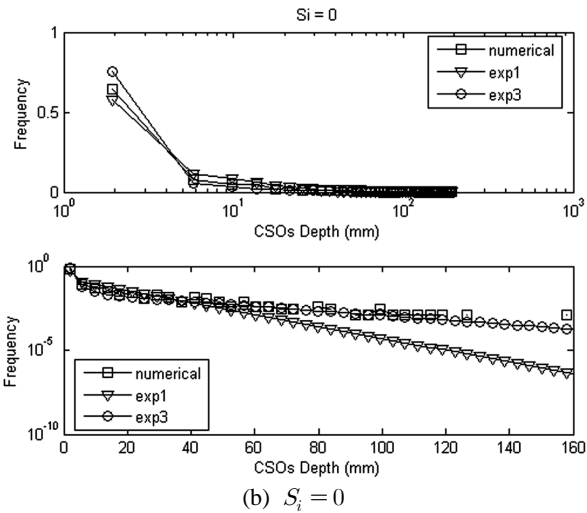
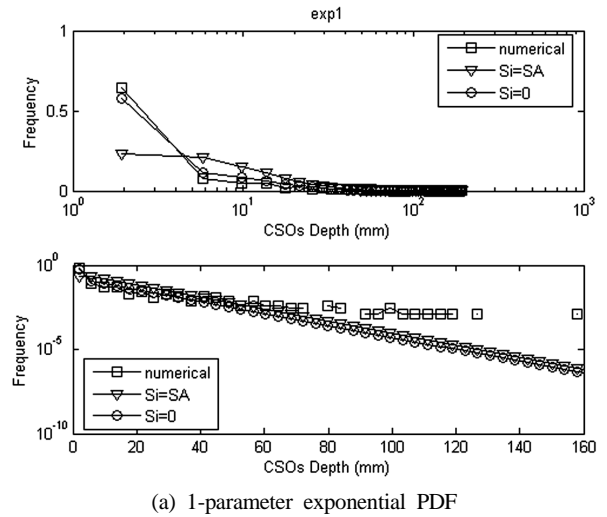
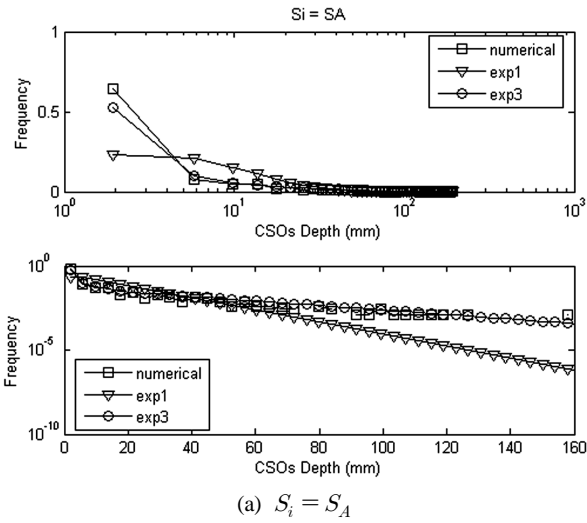


Fig. 7. PDF of CSOs from a water quality control basin.

Fig. 8. Comparison with PDFs of CSOs.

혼합 지수 PDF를 이용하면 월류량이 비교적 작은 경우 실제 수치 모의된 월류량의 확률곡선이 유도된 두 곡선 사이 범위에서 양호하게 움직이고 있으며, 월류량이 큰 경우에도 두 곡선과 유사한 확률적인 움직임을 보여주고 있다.

4. 결론

도시하천 오염의 주된 원인 중 하나인 비점오염원 관리를 위해서 강우-유출 제어 관련 연구들이 기존에 국내외를 불문하고 다양하게 연구된 바 있으나, 연구에 있어 가장 중요하다고 할 수 있는 강우를 모의하는데 있어 이제껏 그 복잡성을 경감시키기 위해 1변수 지수 PDF를 사용하여 왔다. 그러나 1변수 지수 PDF는 강우 현상을 너무 단순화시키기 때문에 효과적인 비점오염원 관리를 위해서는 부적합한 것이 사실이다. 이에 본 연구에서는 3변수 지수 PDF를 사용하여 복잡한 강우 현상을 보다 자세히 모의하고자 하였으며 이를 기반으로 저류형 비점저감시설의 월류 확률과 월류고에 대한 PDF를 유도하고자 하였다.

유도된 PDF에 대한 분석을 위하여 부산 온천천 유역을 적용 대상 지역으로 하여 1변수 지수 PDF와 3변수 지수 PDF의 차이점을 명확히 하고자 하였다. 즉, 관측 강우량과의 비교를 통하여 1변수 지수 PDF보다 3변수 지수 PDF가 실제 강우량의 확률적인 거동을 보다 더 잘 재현함을 알 수 있었으며, 모의 월류량과의 수치적인 비교에서도 역시 3변수 지수 PDF가 월류량의 확률적인 거동을 보다 잘 재현함을 알 수 있었다. 특히 강우가 많은 경우의 월류량에 있어 3변수 지수 PDF를 적용시킨 강우가 실제 수치적으로 모의된 자료의 특성을 더욱 잘 재현하였다. 따라서 기존에 많이 사용되어 온 1변수 지수 PDF보다 3변수 지수 PDF를 사용하는 것이 복잡한 강우의 특성을 자세히 반영하는데 적절한 것으로 판단되며 이를 바탕으로 강우의 지역적 특성을 반영한 비점오염원의 관리대책을 수립하는 데 도움이 될 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 환경부 '2007년도 차세대 핵심환경기술개발사업(GIS 기반의 비점오염물질 발생량 예측 모델개발)'의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 김상단, 조덕준(2007). 비점오염원 관리를 위한 유출포착곡선. *한국물환경학회지*, **23**(6), pp. 829-836.
- 조덕준(2007). 위험도 기반 지역별 정규 CSOs 곡선 설계에 관한 연구. *한국수자원학회논문집*, **39**, pp. 575-581.
- 조덕준, 김건하(2006). 소규모 도시유역 합류식 하수관거 월류수 특성화 및 최적 저류지 용량결정. *한국물환경학회지*, **22**(2), pp. 314-320.
- 조덕준, 김명수, 이정호, 김중훈(2006). 연속 강우-유출 모의 기법을 이용한 최적 CSOs 산정에 관한 연구. *한국물환경학회지*, **22**(6), pp. 1068-1074.
- 조덕준, 이정호, 김명수, 김중훈, 박무중(2007). 도시유역 CSOs 처리를 위한 저류형시스템 설계용량 산정. *한국물환경학회지*, **23**(6), pp. 490-497.
- Adams, B. J. and Papa, F. (2000). *Urban stormwater management planning with analytical probabilistic models*, John Wiley & Sons, INC.
- Behera, P. K., Papa, F. and Adams, B. J. (1997). Optimization of regional storm water management system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **125**, pp. 107-144.
- Foufoula-Georgiou, E. and Lettenmaier, D. P. (1987). A Markov renewal model for rainfall occurrences. *Water Resources Research*, **23**, pp. 875-884.
- Georgakakos, K. P. and Kavvas, M. L. (1987). Precipitation analysis, modeling, and prediction in hydrology. *Reviews of Geophysics*, **25**, pp. 163-178.
- Guo, Y. and Adams, B. J. (1999a). Analysis detention ponds for stormwater quality control. *Water Resources Research*, **35**, pp. 2447-2456.
- Guo, Y. and Adams, B. J. (1999b). An analytical probabilistic approach to sizing flood control detention facilities. *Water Resources Research*, **35**, pp. 2457-2468.
- Guo, Y. and Urbonas, R. B. (1996). Maximized detention volume determined by runoff capture ratio. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **122**, pp. 33-39.
- Hanson, C. L., Cumming, K. A., Woolhiser, D. A. and Richardson, C. W. (1994). Microcomputer program for daily weather simulations in the contiguous United States. *USDA/ARA, ARS-114*, pp. 38.
- Loganathan, G. V. and Delleur, J. W. (1984). Effects of urbanization on overflows and pollution loadings from storm sewer overflows: a derived distribution approach. *Water Resources Research*, **20**, pp. 857-865.
- Loganathan, G. V., Delleur, J. W. and Segarra, R. I. (1985). Planning detention storage for stormwater management. *Journal of Resources Planning and Management*, **111**, pp. 382-398.
- Milks, D. S. (1998). Multisite generalization of a daily stochastic precipitation generation model. *Journal of Hydrology*, **210**, pp. 178-191.
- Rodriguez-Iturbe, I., Gupta, V. K. and Waymire, E. (1984). Scale consideration in the modeling of temporal rainfall. *Water Resources Research*, **20**, pp. 1611-1619.
- Smith, R. E. and Schreiber, H. A. (1974). Point processes of seasonal thunderstorm rainfall. Part 2: rainfall depth probabilities. *Water Resources Research*, **10**, pp. 418-423.
- U.S. Army Corps of Engineers (1974). Storage, treatment, overflow, runoff model; STORM, NO. 723-S8-L2520, *Hydrologic Engineering Center*, Davis, CA.
- U.S. EPA (1986). Methodological for analysis of detention basins for control urban runoff quality.