

## 3변수 혼합 지수 확률밀도함수를 이용한 도시 강우 유출수 포착곡선의 작성

한수희 · 박무종\* · 김상단†

부경대학교 환경시스템공학부

\*한서대학교 토목공학과

### Urban Stormwater Capture Curve using 3-Parameter Mixed Exponential Probability Density Function

Suhee Han · Moo Jong Park\* · Sangdan Kim†

Department of Environmental System Engineering, Pukyong National University

\*Department of Civil Engineering, Hanseo University

(Received 30 April 2008, Accepted 3 June 2008)

#### Abstract

In order to design Non-point source management, the aspect of statistical features of the entire precipitation data should be focused since non-point source discharge is driven by continuous rainfall runoffs. 3-parameter mixed exponential probability density function is used to establish urban stormwater capture curve instead of previous single-parameter exponential PDF. Then, recent 10-year data in Busan are applied to establish the curve. The result shows that 3-parameter mixed PDF gives better resolution.

**keywords** : Non-point source management, SCS curve number, Urban stormwater capture curve, Water quality control basins

## 1. 서론

지금까지 강우-유출 제어 시스템에 관한 연구는 주로 극한사상에 한정되어 왔다. 이러한 연구 방향은 강우-유출 관계에 있어서 주된 관심 사항이 홍수방어에 있어 왔기 때문일 것이다. 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. 이는 전체 강우사상 중에서 5%미만의 강우사상만이 2년 빈도를 초과하며, 10년 빈도 강우량을 초과하는 경우는 1% 미만에 불과하다는 Guo and Urbonas(1996)의 연구만 보더라도 쉽게 짐작할 수 있다.

비점오염원의 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, Guo and Urbonas(1996)는 저류형 비점저감시설에 대한 비초과 확률을 정의하는 강우유출수 포착곡선을 작성하기 위하여 기초적인 강우-유출 분석을 수행하였으며, Behera 등(1999)은 도시 배수시스템에서의 저류량, 방류량, 지점저감시설의 용량 등에 대하여 확률적 해석방법을 적용하여 다양한 유출 제어 시설물의 최적규모를 결정할 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 Guo and Hughes(2001)는 강우사상의 분포를 분석하여 이로부터 침투 트렌치의 설계를 위한 강우유출수 포착곡선을 유도한 후, 이를 미국의 여러 도시 유역에 적용한 바 있다. 비교적 최근에는 전체 강우사상의 통계학적 분석으로부터 비점오염원 관리를 위한 강우유출수 포착곡선이 Guo and Urbonas(2002)에 의해 유도되었으며, 국내에서도 조덕준(2007)에 의해 이에 대한 적용가능성에 대한 평가가 이루어진 바 있다. 김상단과 조덕준(2007)은 상기 연구들을 기반으로 하여 합리식을 기반으로 한 강우-유출 관계를 국내에서 가장 일반적으로 적용되고 있는 SCS 유출곡선법으로 대체하여 강우유출수 포착곡선을 유도함으로써 강우-유출 관계의 비선형을 고려함과 동시에 복잡한 토지이용특성을 가진 우리나라의 도시배수분구에 적용 시 보다 합리적인 설계가 이루어질 수 있도록 하고자 하였다. 이러한 일련의 연구들은 연속적인 강우사상을 대상으로 비교적 간단하게 비점오염원을 유출시키는 강우유출수의 양을 산정할 수 있는 대안으로 제시되었으며, 또한 저류형 비점저감시설의 적정 크기를 산정할 수 있는

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

방법론 개발의 과정으로 평가할 수 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 가정하였다는 단점을 내포하고 있다. 실제 강우유출수의 해석적 확률모형의 구축 시 가장 중요하게 고려해야 할 사항들 중 하나가 연속된 전체 강우자료의 통계학적 특성의 적절한 구현인 점을 상기하여 볼 때, 강우량이 1변수 지수 PDF를 따른다는 가정은 너무 현상을 단순화시킨 측면이 있다. 국내의 실제 강우량 자료를 이용하여 이에 대한 적절성을 평가해 본 결과, 1변수 지수 PDF에 강우량 자료를 적합시키는 데에는 많은 문제점이 있는 것으로 파악되었다.

이에 본 연구에서는 도시지역 비점오염원을 관리하기 위한 강우유출수 포착곡선의 작성한 김상단과 조덕준(2007)의 추가적인 연구로서, 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 부산지역 최근 10년간 관측된 연속강우사상에 적용하여 저류형 비점저감시설의 적정 크기를 설정하기 위한 유출포착곡선을 작성해보고자 한다. 또한 기존의 1변수 지수 PDF를 이용한 경우와 3변수 지수 PDF를 이용하여 유도된 결과들을 서로 비교함으로써 3변수 지수 PDF의 상대적인 우수성을 살펴보고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. IETD (InterEvent Time Definition)

장기간의 강우자료를 살펴보면 수많은 0값(즉, 무강우기

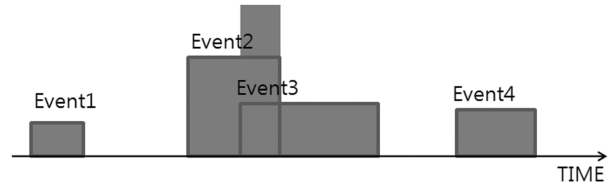


Fig. 2. Poisson rectangular pulse point rainfall model (after Kim and Jo, 2007).

록)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 무 강우시간이 IETD보다 길 경우 무강우시간 전과 후의 두 개의 강우기록들은 각각의 개별적인 강우사상이 된다(Fig. 1 참조).

본 연구에서는 IETD 결정에 있어 Rodriguez-Iturbe 등 (1984)이 제안한 Poisson Rectangular Pulse를 이용하여 강우를 모형화한 후(Fig. 2), 모형의 구조와 그 모형의 구조에 합당한 매개변수를 추정하여 IETD를 결정하는 방법을 도입하였다. 이에 관한 보다 상세한 사항은 김상단과 조덕준(2007)을 참조할 수 있다.

### 2.2. 강우사상별 분석

IETD 6시간으로 부산지점 최근 10년간의 강우사상을 분석한 결과 강우의 발생 개수는 765회로 나타났다. 이는 일

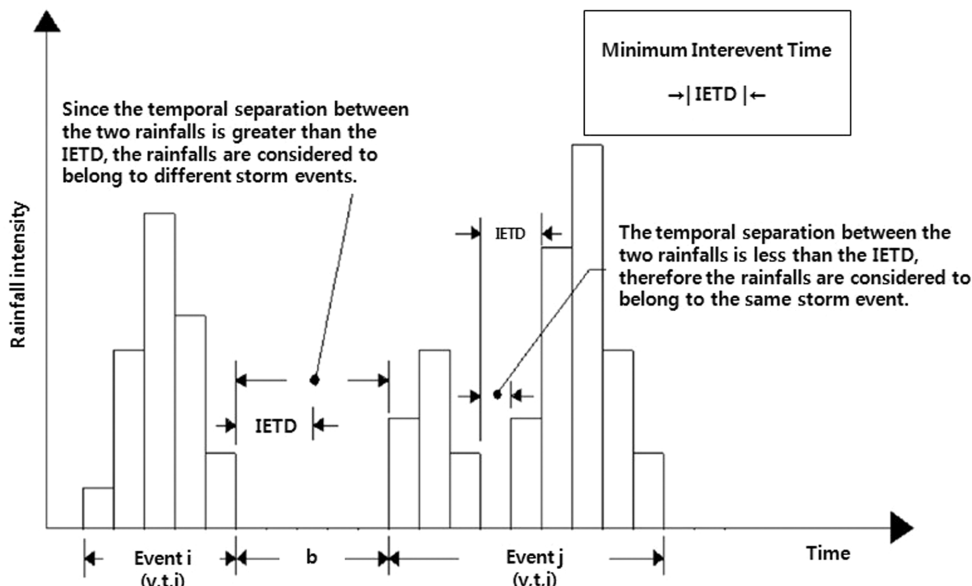


Fig. 1. Definition of IETD (after Kim and Jo, 2007).

년에 약 77회 정도 강우사상이 발생된다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 전술한 바와 같이 강우량의 PDF로서 현재까지의 관련된 연구들에서 강우량을 표현하기 위한 PDF로 쓰였던 1변수 지수 PDF 대신에 3변수 혼합 지수 PDF를 적용하였으며, 강우량  $v$ 에 대한 3변수 혼합 지수 PDF는 다음과 같다.

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

여기서, 매개변수  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 아래와 같은 관계식을 통하여 추정이 가능하다.

$$\text{평균 } m = \beta + \alpha\gamma - \beta\gamma \quad (2)$$

$$\text{분산 } \sigma^2 = -\gamma^2(\alpha + \beta)^2 + 2\gamma\alpha\beta + \beta^2 \quad (3)$$

왜곡도계수

$$C_s = (\alpha - \beta)^3 - 3\alpha\gamma^2(\alpha - \beta)^2 + 3\alpha^2\gamma(\alpha - \beta) + \beta^3 \quad (4)$$

여기서,  $f(V)$ 는 강우량  $V$ 의 확률밀도이다. 누가확률분포는 비 초과확률로서 다음과 같다.

$$P_V(0 \leq v \leq V) = 1 - \gamma e^{V/\alpha} - (1-\gamma)e^{-V/\beta} \quad (5)$$

Fig. 3에서 osberved는 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. 3로부터 1변수 지수 PDF보다는 3변수 지수 PDF가 실제 강우량의 확률적인 거동을 보다 잘 재현하고 있음을 살펴볼 수 있다. 이 때, 강우가 적을 경우의 빈도분포와 강우가 많을 경우의 빈도분

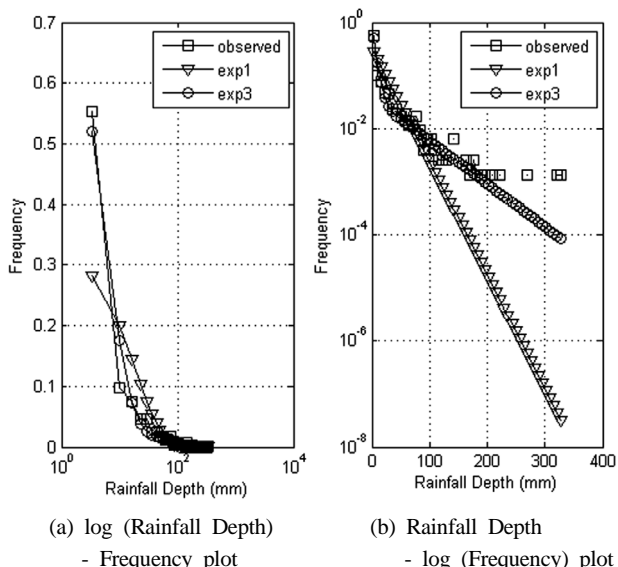


Fig. 3. PDF of Rainfall volume (after Choi et al., 2008).

포를 보다 잘 비교하기 위하여 Fig. 3을 산술 축과 대수축으로 나누어 도시하였다. 3변수 지수 PDF의 경우 강수량이 적은 강우사상에 대하여 1변수 PDF와 비교하였을 때 관측 자료의 거동을 매우 우수하게 재현하고 있으며, 강수량이 많은 경우에 대해서도 1변수 PDF보다는 3변수 PDF가 실제 강수량의 확률적 거동을 보다 잘 표현하고 있는 것으로 나타나고 있다. 참고로 사용된 부산시점 최근 10년간 자료의 강수량 평균은 20.34 mm이며, Fig. 3에 적용된 매개변수 값으로는  $\alpha$ 는 53.6207 mm,  $\beta$ 는 5.6244 mm,  $\gamma$ 는 0.3066이 적용되었다. 추후 저류형 비점저감시설의 크기를 결정하고자 할 때, 식 (7)은 비점저감시설에 의해 포착된 강우량의 비율을 정량화시키는 기본적인 도구를 제공하게 될 것이다.

2.3. 유출 분석

연속강우사상으로부터 저류형 비점저감시설의 적정크기를 설정하기 위한 강우유출수 포착곡선을 작성하기 위하여 본 연구에서 도시화한 도시배수시스템을 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4에 도시한 바와 같이 강우-유출-손실관계에 SCS 유출곡선법을 적용하면 유역에서의 유출고(단위: mm)는 아래와 같이 표현될 수 있다(Soil Conservation Service, 1972).

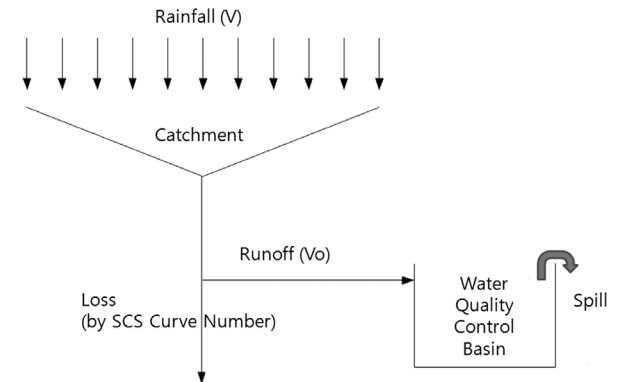


Fig. 4. Schematic diagram of urban drainage system (after Kim and Jo, 2007).

$$V_o = 0, \text{ for } V < V_i$$

$$V_o = \frac{(V - V_i)^2}{V - V_i + S}, \text{ for } V \geq V_i \quad (6)$$

여기서  $V_o$ =유출고(mm),  $V$ =강우량(mm),  $V_i$ =지면 저류고(mm)로서 본 연구에서 지면 저류고는 Driscoll 등(1989) 및 Guo and Urbonas(1996)의 연구를 참고하여 2.5 mm를 적용하였다. 식 (6)에서 토양함수비  $S$ 는 아래와 같이 표현된다.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (7)$$

여기서, CN는 SCS의 유출 곡선번호(Curve Number)로서, 개략토양도 및 토지이용도를 통하여 비교적 손쉽게 산정가

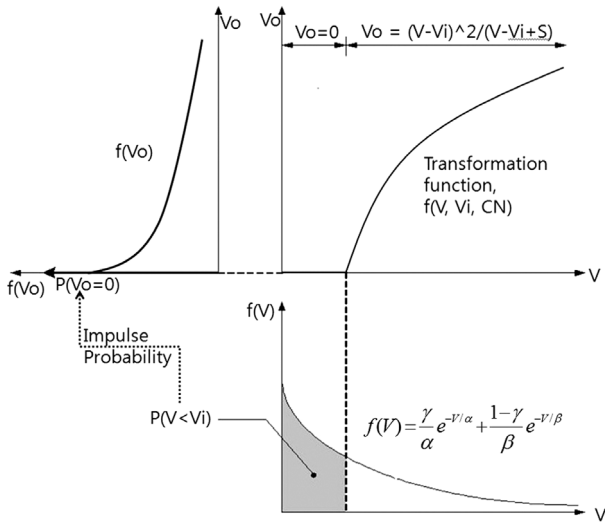


Fig. 5. Derived probability density function.

능하다(윤용남, 2008). 참고로 개략도양도 및 토지이용도 관련 GIS 파일은 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)을 통하여 현재 인터넷을 통하여 직접 제공되고 있다.

유도된 확률밀도함수(derived probability density function) 이론을 적용하면, 강우-유출모형인 식 (6)과 강우량에 대한 확률밀도함수인 식 (1)로부터 유출량의 확률밀도함수를 다음과 같이 얻을 수 있다(Fig. 5 참조).

강우-유출 모형에 따르면 강우량이 지면 저류고를 넘지 못하면 그 강우사상은 유출을 발생시키지 않을 것이므로 결과적으로 강우 발생 시 유출이 발생하지 않을 확률은 강우량이 지면 저류고  $V_i$ 를 넘지 않을 확률과 같게 되며, 이때의 확률은 임펄스 확률(impulse probability)로 나타내어지고 그 크기는 Fig. 5의 음영 처리된 면적에 해당된다. 강우량이 지면 저류고  $V_i$ 를 넘지 않을 확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P(V_o = 0) = P(V \leq V_i) = \int_0^{V_i} f(V) dV \tag{8}$$

$$= 1 - \gamma e^{-V_i/\alpha} - (1-\gamma)e^{-V_i/\beta}$$

유출의 발생( $V_o > 0$ )은 곧 강우량이 지면 저류고보다 크게 될 때이며( $V > V_i$ ), 이 때의 유출량의 누가확률밀도함수(cumulative probability density function)는 다음과 같이 계산된다.

$$C_V = F(V_o) = \int_0^{V_o} f(V_o) dV_o = P(V_o = 0) + P(V_i < V < k) \tag{9}$$

$$= 1 - \gamma e^{-k/\alpha} - (1-\gamma)e^{-k/\beta}$$

여기서  $k$ 는 다음과 같이 산정된다.

$$k = \frac{V_o + 2V_i + \sqrt{V_o^2 + 4V_o * S}}{2} \tag{10}$$

식 (9)에서  $V_o$ 를 설계된 저류형 비점저감시설의 크기로 놓으면,  $C_V$ 는 강우량이 발생하였을 때  $V_o$ 보다 작은 유출고를 갖는 확률이 된다. 즉,  $C_V$ 는 비점저감시설의 크기를  $V_o$ 로 설계하였을 경우의 강우유출수 포착비율로서, 이는 해당 배수분구의 평균 강우량, CN값 및 지면 저류고에 의하여 결정됨을 살펴볼 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 6은 부산 온천천 유역(CN=62)을 대상으로 식 (9)에 의하여 예측된 강우유출수 포착비율과 실제 최근 10년간의 연속강우기록으로부터 SCS 유출곡선법에 의해 계산된 강우유출수 포착비율을 비교한 것이다. Fig. 6에서 numerical은 관측 강우자료를 이용하여 유출모형에 적용시킨 수치적인 결과를 의미하며, analytical Exp3는 본 연구에서 유도한 3변수 혼합 지수확률밀도함수를 적용하여 해석적으로 유도한 식으로 도출된 결과를 의미한다. 또한, analytical Exp1은 기존의 1변수 지수확률밀도함수를 적용하여 해석적으로 유도한 식으로 도출된 결과이다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 강우량의 PDF로서 1변수 지수 PDF보다는 3변수 혼합 지수 PDF를 사용하여 강우유출수 포착비율을 해석적으로 유도한 경우가 수치적으로 모의된 강우유출수 포착비율을 보다 잘 재현하고 있음을 살펴볼 수 있다. Fig. 7은 CN값이 50, 60, 70, 80, 90, 100의 값을 가질 경우 식 (9)로부터 작성된 강우유출수 포착곡선을 도시하고 있다.

식 (9)로 표현되는 강우유출수 포착곡선은 0에서 1까지의 값을 갖게 되며 Fig. 7에 도시한 바와 같이 강우유출수 포착곡선은  $V_o/V_m$ 가 커지게 되면 1로 접근하는 형태를 보이게 되는데, 실무적인 관점에서는 구현 가능한 포착 범위에 대한 논의가 필요하다. 즉, 저류형 비점저감시설을 통하여 유역에서 발생되는 모든 강우유출수를 포착하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에, 합성된 강우유출수 포착곡선을 통하여 어느 정도까지의 강우유출수를 포착할 것인가에 대한 기준이 필요할 것이다. 예를 들어, 저류형 비점저

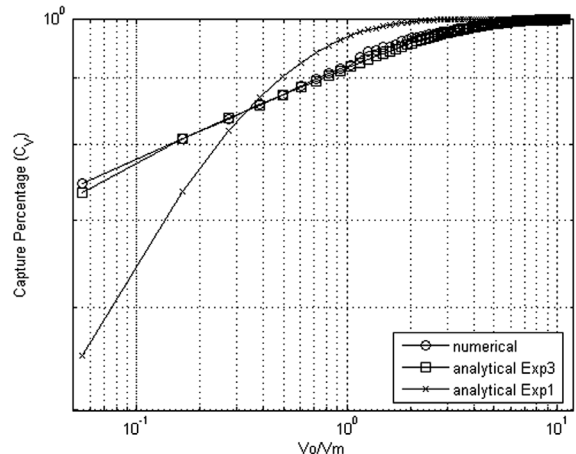


Fig. 6. Stormwater capture curves by model prediction and long-term simulation for Busan On-cheon stream.

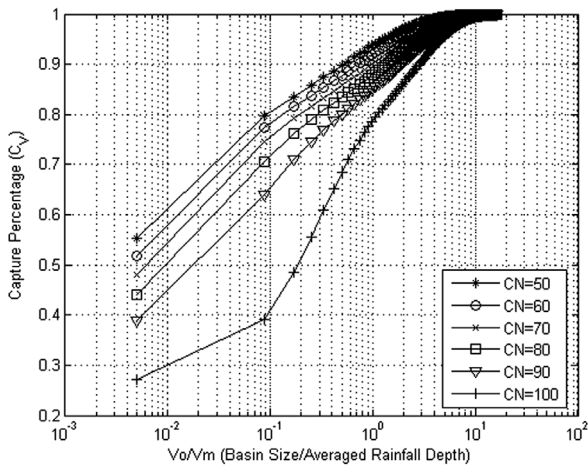


Fig. 7. Stormwater capture curves for various curve numbers with  $V_i = 2.5$  mm.

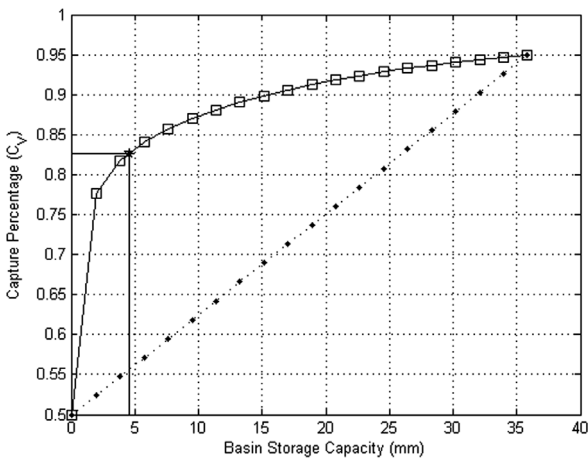


Fig. 8. Stormwater capture curve developed for sizing water quality control basin at Busan On-cheon stream.

감시설의 크기를 강우유출수 유출고의 50~95% 정도를 포착하는 것으로 설계할 수 있을 것이다. Fig. 8은 이러한 경우에 대한 유출포착곡선을 도시하고 있다.

포착범위 50~95%에 대응하는 비점오염원 관리 목적 저류고 크기의 범위는 0.09~35.84 mm에서 결정됨을 알 수 있다. 최적 설계 저류고는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 제시된 범위에서의 평균 기울기와 비교하면, 0.09~4.54 mm의 범위는 평균 기울기보다 강우유출수 포착곡선의 경사가 보다 급한 반면에 4.54~35.84 mm에서는 평균 기울기보다 강우유출수 포착곡선의 경사가 보다 완만함을 알 수 있다. 결국 대상구역의 저류형 비점저감시설의 최적크기는 4.54 mm의 강우유출수를 포착할 수 있는 정도의 크기, 즉 4.54 mm에 해당 배수구역의 면적을 곱함으로써 실제 저류형 비점저감시설의 용량을 선정하는 것이 가장 경제적임을 알 수 있다. 이때의 포착비율은 82.69%로서, 이는 유역에서 발생하는 강우유출수의 82.69%가 저류형 비점저감시설에 의해 포착 가능함을 의미한다. 다른 한편, 본 연구에서 설정한 4.54 mm의 최적 크기는 환경부(2006)에서 제시하고 있는 5mm 이상의 처리 용량 기준과도 비슷한 결과를 주고

있음을 살펴볼 수 있다. 따라서 환경부(2006)에서 제시하고 있는 설계 용량이 개략적으로는 타당한 값을 주고 있음을 확인할 수 있으며, 지역별 또는 시기별로 보다 경제적인 설계 용량을 결정하기 위해서는 본 연구에서 제안한 방법을 도입해 보는 것도 바람직할 것으로 기대된다.

### 4. 결론

도시지역 비점오염원 관리 시스템을 설계하기 위한 선행 연구 대부분이 수학적 유도과정의 복잡성을 경감시킬 목적으로 강우사건 발생 시 내리는 비의 양이 1변수 지수 확률밀도함수에 따른다는 가정을 전제로 하고 있다. 그러나 강우를 어떻게 표현하는 지가 강우유출수의 해석과 관련된 연구에 가장 중요한 요소인 이상, 좀 더 정밀한 강우모형이 필요하며 이에 본 연구에서는 3변수 혼합 지수 확률밀도함수를 적용하여 강우량을 보다 정밀하게 통계학적으로 표현하고자 하였다. IETD 6시간으로 한국의 부산지점 최근 10년간의 강우사상을 분석하여 적용시켜 살펴본 결과 3변수 혼합 지수 확률밀도함수가 실제 강우를 재현함에 있어 더욱 정밀함을 알 수 있었으며, 따라서 이를 바탕으로 강우유출수 포착곡선의 설계가 가능함을 살펴보았다.

본 연구에서는 제안한 방법은 Guo and Urbanas(2002)의 방법을 토대로 강우-유출 관계를 한국에서 가장 일반적으로 적용되고 있는 SCS 유출곡선법으로 대체한 김상단과 조덕준(2007)의 연구를 토대로 함으로써, 강우-유출 관계의 비선형을 고려함과 동시에 복잡한 토지이용특성을 가진 한국의 도시배수분구에의 적용 시 보다 객관적인 설계가 이루어질 수 있도록 하였다.

또한 본 연구에서 설정한 최적 처리 용량 크기가 환경부(2006)에서 제시하고 있는 것과 개략적으로 비슷하여 설계 용량이 타당함을 간접적으로 확인할 수 있어, 본 연구를 바탕으로 한 지역별 또는 시기별로 보다 경제적인 설계 용량을 결정하기 위한 연구가 앞으로 진행되는 것이 바람직할 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.  
 윤용남(2008). *공업수문학*, 청문각.  
 조덕준(2007). 위험도 기반 지역별 정규 CSOs 곡선 설계에 관한 연구. *한국수자원학회논문집*, 39, pp. 575-581.  
 최대규, 조덕준, 한수희, 김상단(2008) 3변수 혼합 지수 확률밀도함수를 이용한 도시지역 강우유출수의 해석적 확률모형 개선. *한국물환경학회지*, 24(3), pp. 797-803.

- 환경부(2006). *비점오염원관리 업무편람*.
- Adams, B. J. and Papa, F. (2000). *Urban Stormwater Management Planning with Analytical Probabilistic Models*. John Wiley & Sons, INC., U.S.A.
- Behera, P. K., Papa, F. and Adams, B. J. (1999). Optimization of regional storm water management system. *Journal of Water Resources Planning and management*, **125**, pp. 107-144.
- Driscoll, E. D., Palhegyi, G. E., Strecker, E. W. and Shelley, P. E. (1989). Analysis of storm events characteristics for selected rainfall gauges throughout the United States, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- 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, J. C. Y. and Hughes, W. (2001). Storage volume and overflow risk for infiltration basin design. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **127**, pp. 170-175.
- Guo, J. C. 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.
- Guo, J. C. Y. and Urbonas, R. B. (2002). Runoff Capture and Delivery Curves for Storm-Water Quality Control Designs. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **128**, pp. 208-215.
- 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.
- 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.
- Soil Conservation Service (1972). National Engineering Handbook, section 4, Hydrology. U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C.