

## 도시구역 CSOs 처리를 위한 저류형시스템 설계용량 산정

조덕준 · 이정호<sup>\*†</sup> · 김명수<sup>\*\*</sup> · 김종훈<sup>\*</sup> · 박무종<sup>\*\*\*</sup>

동서대학교 건축토목시스템공학부

<sup>\*</sup>고려대학교 건축 · 사회환경공학과

<sup>\*\*</sup>(주)남원건설엔지니어링 수자원부

<sup>\*\*\*</sup>한서대학교 토목공학과

## Estimation of Storage Capacity for CSOs Storage System in Urban Area

Jo, Deok Jun · Lee, Jung Ho<sup>\*†</sup> · Kim, Myoung Su<sup>\*\*</sup> · Kim, Joong Hoon<sup>\*</sup> · Park, Moo Jong<sup>\*\*\*</sup>

*Department of Architecture and civil engineering system, Dongseo University*

*<sup>\*</sup>Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University*

*<sup>\*\*</sup>Department of Water Resource engineering, Namwonkeonseol Engineering Co., Ltd.*

*<sup>\*\*\*</sup>Department of Civil Engineering, Hanseo University*

*(Received 12 April 2007, Accepted 15 June 2007)*

### Abstract

A Combined sewer overflows (CSOs) are themselves a significant source of water pollution. Therefore, the control of urban drainage for CSOs reduction and receiving water quality protection is needed. Examples in combined sewer systems include downstream storage facilities that detain runoff during periods of high flow and allow the detained water to be conveyed by an interceptor sewer to a centralized treatment plant during periods of low flow. The design of such facilities as stormwater detention storage is highly dependant on the temporal variability of storage capacity available (which is influenced by the duration of interevent dry periods) as well as the infiltration capacity of soil and recovery of depression storage. As a result, a continuous approach is required to adequately size such facilities. This study for the continuous long-term analysis of urban drainage system used analytical probabilistic model based on derived probability distribution theory. As an alternative to the modeling of urban drainage system for planning or screening level analysis of runoff control alternatives, this model have evolved that offer much ease and flexibility in terms of computation while considering long-term meteorology. This study presented rainfall and runoff characteristics of the subject area using analytical probabilistic model. This study presented the average annual COSs and number of COSs when the interceptor capacity is in the range  $3 \times DWF$  (dry weather flow). Also, calculated the average annual mass of pollutant lost in CSOs using Event Mean Concentration. Finally, this study presented a decision of storage volume for CSOs reduction and water quality protection.

**keywords** : Analytical probabilistic model, Combined sewer overflows, Event mean concentration

### 1. 서론

도시의 하수 시스템은 도시하천의 오염을 저감하기 위하여 건기는 물론 우천시에도 생활하수의 3배를 차집하고 있으며 차집되지 못한 유량은 하천으로 방류시킨다(한국수도협회, 1998). 이러한 하천으로 방류되는 월류수를 합류식 하수관거 월류수(Combined Sewer Overflows: CSOs)라 하며 비점오염원을 포함하는 CSOs에 의한 하천 오염을 방지하기 위하여 장치형 또는 저류형 처리시스템이 도입되고 있으며, 이러한 처리시스템의 설계를 위해서는 강우로 인한 유역 내 비점오염원 유출량의 예측기법이 충분히 정립되어 있어야 한다.

국내에서 비점오염원에 대한 연구는 최근 활발히 이루어지고 있는데 분포형 수질관리 모형과 GIS를 이용하여 복합천 유역의 비점오염원 예측을 시도하였으며(유 등, 2004), 공주지역 주차장 및 교량지역의 비점오염물질의 유출경향 모니터링 및 EMC(Event Mean Concentration)의 산정과 초기강우의 현상 파악 및 동적 EMC를 제안하였고(김 등, 2005b), 유역의 특성인자들로 BOD EMC의 추정과 강우량으로 BOD 부하량을 계산하는 BOD 항목 EMC 추정식을 유도한 바 있으며(김 등, 2005a), 금강유역의 임야, 농지, 도시지역의 강우 유출수를 모니터링하고 비점원에서 발생하는 미생물학적 오염을 추정한 연구가 있으며(김, 2006), 도시지역 비점오염원을 동반하는 CSOs의 유출고 및 유량을 비초과확률 개념에 의하여 동일 위험도 기반으로 산정하는 절차를 제시하였으며(조, 2006), 도시 소유역의 CSOs 특성 및 부하 추정, 초기유출 효과 및 저류지 설계방법을

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
jungho\_lee@korea.ac.kr

제시한 연구가 있었다(조 등, 2006a).

최근 국내에서는 차집되지 못하는 초기우수로 인한 비점 오염원의 하천유출을 저감하기 위하여 장치형 또는 저류형 시스템을 도입하고 있다. 장치형 처리시설은 국내외에 많은 특허와 상용화되어 있으나 저류형 시스템은 시설규모 결정을 위한 기준도 정립되어 있지 못한 실정이다. 본 연구에서는 비점오염원을 유발하는 장기간의 연속강우사상으로부터 산정된 표준강우와 유출특성으로부터(조 등, 2006b) 유출확률과 월류량 감소를 고려하여 CSOs의 저류지 규모를 산정하여 비점오염원의 저류형 시스템설계에 적용하기 위한 방안을 제시하였다.

## 2. 재료 및 방법

본 연구에서는 연속강우사상을 독립강우사상으로 분리하여 표준강우사상을 유도(권, 2003)하고 해석적 확률모형에 의한 강우-유출관계로부터 분석된 유출특성(조 등, 2006a, 2006b)에 대한 최근 연구 성과를 이용하여 유출조절을 및 월류감소율에 따른 저류용량 관계를 해석적으로 규명하여 저류지를 결정하는 과정을 제시하였다.

### 2.1. IETD개념을 이용한 표준강우 산정

강우에 의한 비점오염원의 유출량은 장기간의 연속강우 특성으로부터 표준강우량을 유도하여 유출특성을 분석할 수 있는데 이를 위해서는 연속강우를 각각의 독립강우사상으로 분리하여야 하며 이는 강우사상사이의 시간(Inter-Event Time Definition: IETD)인 무강우지속기간에 의해서 분리될 수 있다(Adams et al., 2000). IETD 결정방법에는 autocorrelation분석, 변동계수분석, 연평균 강우사상 갯수분석 등이 있으며, IETD에 의해 분리된 강우사상의 통계특성들은 연속확률분포의 변수로 표현할 수 있는데 이들의 확률밀도함수(probability density function: PDF)는 지수함수분포를 따르는 것으로 알려져 있다(Eagleson, 1972; Adams et al., 1986). 연속강우사상의 통계특성들의 PDF로 지수함수를 이용하면 장기간의 강우사상을 확률적 개념으로 재현할 수 있으며 독립강우사상의 연평균강우량 및 재현기간에 따

른 확률강우량을 해석적으로 산정할 수 있다.

### 2.2. 해석적 강우-유출 모형에 의한 유출특성

도시지역의 수문변환을 수치적으로 해석하고 모형화하기 위하여 강우특성을 지수함수의 PDF로 나타내고 강우-유출 관계를 함수의 형태로 표현하는 해석적 확률모형에 적용하여 유출특성을 표현할 수 있는데 이를 위한 강우-유출 관계를 모식도로 나타내면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1과 같이 강우량( $v$ )이 지면저류( $S_d$ )를 초과하는 경우에만 유출율( $\phi$ )에 따라 유출된다. 이때 유출이 발생하지 않을 확률은 강우량이 지면저류량을 초과하지 않을 확률로서 이를 Impulse Probability로 나타낼 수 있다(Adams et al., 2000). 강우량이 지면저류량보다 크면( $v > S_d$ ) 유출량의 누가확률분포함수(Cumulative Distribution Function: CDF)가 존재하며 이를 미분하여 유출량의 PDF를 유도할 수 있다.

$$f_{V_r}(v_r) = \frac{d}{dv_r} F_{V_r}(v_r) = \frac{\zeta}{\phi} e^{-\zeta((v_r/\phi) + S_{d_i})}, \quad v_r > 0 \quad (1)$$

유출량  $R$ 을 강우별 유출기대값  $E[V_r]$ 과 연평균 강우사상 횟수  $\theta$ 로 나타내면 다음과 같다.

$$E[V_r] = 0 \cdot p_{v_r}(0) + \int_{v_r=0}^{\infty} v_r f_{V_r}(v_r) dv_r = \frac{\phi}{\zeta} e^{-\zeta S_{d_i}} \quad (2)$$

$$R = \theta E[V_r] = \theta \frac{\phi}{\zeta} e^{-\zeta S_{d_i}} \quad (3)$$

강우로 인한 유출발생확률은 식 (4)와 같으며 연평균 유출사상의 횟수  $n_r$ 은 식 (5)와 같다.

$$\text{Prob}[V_r > S_{d_i}] = \int_{v=S_{d_i}}^{\infty} f_{V_r}(v) dv = \int_{v=S_{d_i}}^{\infty} \zeta e^{-\zeta v} dv = e^{-\zeta S_{d_i}} \quad (4)$$

$$n_r = \theta \cdot \text{Prob}[V > S_{d_i}] = \theta e^{-\zeta S_{d_i}} \quad (5)$$

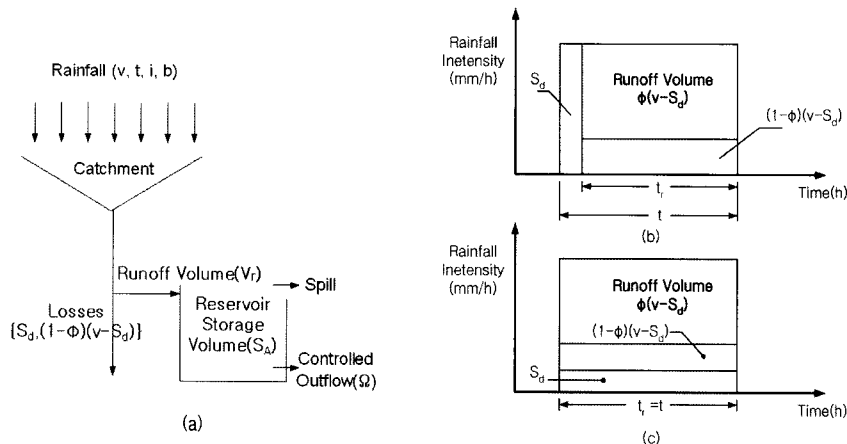


Fig. 1. Schematic rainfall-runoff relation of urban drainage system.

이상을 이용하면 강우에 의한 유출량 및 유출발생횟수를 해석적 확률모형으로 산정할 수 있으며 기 언급한 바와 같이 기존 연구성과를 저류지 산정을 위한 유출특성자료로 사용하였다.

2.3. 유출조절에 의한 월류량 산정

2.3.1. 월류량 산정의 기본개념

합류식 하수관거시스템에서 방류하천의 수질오염 경감을 위해서는 월류량을 제한시키는 저류형 시설(storage facilities)이 필요하다. 도시우수배제시스템에서의 유입량-저류량-유출량 관계를 나타낸 유출조절시스템을 모식화하면 Fig. 2와 같다.

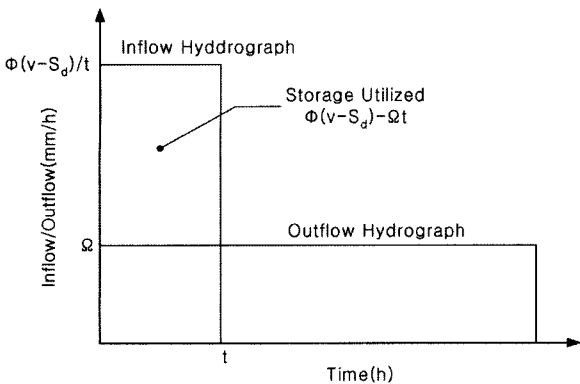


Fig. 2. Outflow control system to calculate a storage space.

해석적 확률모형에 의한 저류지의 유입-유출 관계 분석을 위하여 U.S Army corps of Engineers의 STORM(Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model)에서 적용한 선형관계를 이용하였다. 저류지의 월류량 추정을 위해서는 강우-유

출시의 저류지 수위가 결정되어야 하며 수위는 전 단계 유출의 종료시간과 무강우시간, 다음 단계의 강우-유출의 시작시간의 함수로 표현되며 모형의 경계조건이 된다.

첫 번째 경우로 *i*번째 강우가 끝났을 때 저류지의 수위 (*s<sub>i</sub>*)가 만수위(*S<sub>A</sub>*)라고 가정하여 월류량의 확률분포를 유도하였다.

Fig. 3에서 시간 *t<sub>h</sub>* = 0은 강우가 끝난 시간을 뜻하며 저류시설은 강우의 종료와 동시에 만수위(*s<sub>i</sub>* = *S<sub>A</sub>*)가 된 상태이다. 본 연구에서는 강우시간과 유출시간을 동일하게 가정하여 강우사상사이의 무강우지속시간과 저류지에 유입되는 유입수문곡선의 시간간격을 동일하게 처리하였다.

*i*번째 강우 후 저류지의 수위는 Ω의 비율로 감소하고 *i*+1번째 강우에서의 월류 확률은 IETD가 저류수위가 감소되는 시간(*S<sub>A</sub>*/Ω hr)보다 크고 작은 경우로 구분할 수 있다. Fig. 3(a)는 무강우시간이 *IETD* ≤ *b* ≤ *S<sub>A</sub>*/Ω일 때, Fig. 3(b)는 *IETD* ≤ *S<sub>A</sub>*/Ω ≤ *b*일 때, Fig. 3(c)는 *S<sub>A</sub>*/Ω ≤ *IETD* ≤ *b*일 때 저류지의 거동을 나타낸다. Table 1에 저류시설에서의 임의의 월류량 *p<sub>0</sub>*이상의 월류가 발생할 경우의 조건과 그 때의 월류량(overflow volume)을 정리하였다.

각 강우-유출사상 당 임의의 월류량(*p<sub>0</sub>*)이상의 월류가 발생할 확률 *Gp<sub>1</sub>*(*p<sub>0</sub>*)은 강우지속시간과 무강우시간, 강우량의 결합확률밀도함수(joint PDF)로부터 유도하면 다음과 같다.

*IETD* < *S<sub>A</sub>*/Ω 일 때,

$$Gp_1(p_0) = \int_{t=0}^{\infty} \int_{b=IETD}^{S_A/\Omega} \int_{v=(p_0 + \Omega t + \Omega b)/\phi + S_d}^{\infty} f_{V,B,T}(v, b, t) dv db dt \quad (6)$$

$$+ \int_{t=0}^{\infty} \int_{b=S_A/\Omega}^{\infty} \int_{v=(p_0 + \Omega t + S_A)/\phi + S_d}^{\infty} f_{V,B,T}(v, b, t) dv db dt$$

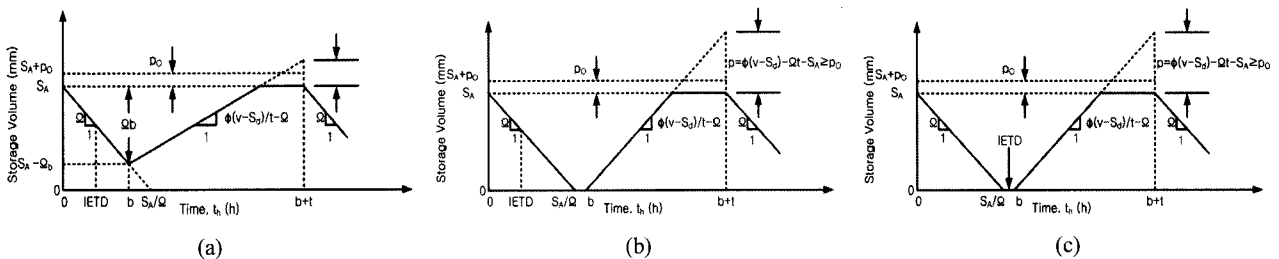


Fig. 3. Variation of storage volume in a storage system.

Table 1. Condition of overflow occurrence (*p* ≥ *p<sub>0</sub>*) and overflow volume

Figure	Condition of overflow occurrence			Overflow volume
	Rainfall duration	Interevent time	Rainfall volume	
Fig. 3(a)	<i>t</i> ≥ 0	<i>IETD</i> ≤ <i>b</i> ≤ $\frac{S_A}{\Omega}$	$v > \frac{p_0 + \Omega t + \Omega b}{\phi} + S_d$	$\phi(v - S_d) - \Omega t - \Omega b$
Fig. 3(b)	<i>t</i> ≥ 0	<i>IETD</i> ≤ $\frac{S_A}{\Omega}$ ≤ <i>b</i>	$v > \frac{p_0 + \Omega t + S_A}{\phi} + S_d$	$\phi(v - S_d) - \Omega t - S_A$
Fig. 3(c)	<i>t</i> ≥ 0	$\frac{S_A}{\Omega}$ ≤ <i>IETD</i> ≤ <i>b</i>	$v > \frac{p_0 + \Omega t + S_A}{\phi} + S_d$	$\phi(v - S_d) - \Omega t - S_A$

$IETD \geq S_A/\Omega$  일 때,

$$G_{P_1}(p_0) = \int_{t=0}^{\infty} \int_{b=IETD}^{\infty} \int_{v=(p_0+\Omega t+S_A)/\phi+S_i}^{\infty} f_{V,B,T}(v,b,t) dv db dt \quad (7)$$

여기서,  $f_{V,B,T}(v,b,t)$ 는 강우량, 무강우시간, 강우지속시간의 결합확률밀도함수로 다음과 같다.

$$f_{V,B,T}(v,b,t) = f_v(v)f_B(b)f_T(t) = \lambda\psi\zeta e^{-\lambda t - \psi(b-IETD) - \zeta v} \quad (8)$$

모형의 초기조건으로 IETD를 0으로 가정( $\psi = \bar{b}^{-1}$ )하였으며 이때 무강우시간  $b$ 의 범위는  $0 < b < \infty$ 가 된다. 각 강우-유출이 저류지에서 월류( $p > p_0 = 0$ ) 발생확률( $G_{P_1}(0)$ )은 다음과 같다.

$IETD < S_A/\Omega$  일 때,

$$G_{P_1}(0) = \frac{\lambda/\Omega}{\lambda/\Omega + \zeta/\phi} \frac{(\psi/\Omega) + (\zeta/\phi)e^{-(\psi/\Omega + \zeta/\Omega)S_A}}{\psi/\Omega + \zeta/\phi} e^{-\zeta S_i} \quad (9)$$

$IETD \geq S_A/\Omega$  일 때,

$$G_{P_1}(0) = \frac{\lambda/\Omega}{\lambda/\Omega + \zeta/\phi} e^{-\zeta(S_A/\phi + S_i)} \quad (10)$$

두 번째 경우로  $i$ 번째 강우가 끝났을 때 저류지를 바닥( $s_i = 0$ )로 가정하여 월류량의 확률분포를 유도하였다.  $i+1$ 번째 강우사상 발생전의 저류지는  $t_h = 0$ 부터  $t_h = b$ 까지 비어있고  $i+1$ 번째 강우사상이 발생할 때 저류시설의 메커니즘은 첫 번째 경우의 Fig. 3(c)와 같이 나타난다. 각 강우-유출사상당 월류량이 임의의 월류량  $p_0$  이상이 될 확률은 다음과 같다.

$$G_{P_2}(p_0) = \int_{t=0}^{\infty} \int_{b=IETD}^{\infty} \int_{v=(p_0+\Omega t+S_A)/\phi+S_i}^{\infty} f_{V,B,T}(v,b,t) dv db dt \quad (11)$$

각 강우-유출사상시 저류지에서 월류가 발생할 확률( $G_{P_2}(0)$ )은 식 (10)과 동일하다.

### 2.3.2. 월류량과 월류횟수의 산정

강우에 따른 월류발생확률을 이용하여 저류지에서의 연평균 월류 횟수를 산정하면 합류식 관거의 월류량 제어(CSOs control)를 위한 시설의 거동을 표현할 수 있다. 따라서 월류확률로부터 하천 월류 강우사상 당 월류량과 연평균 월류량을 구하고, 하천유입 오염부하량을 계산하였다. 저류지에서 월류량의 확률밀도함수(PDF)는 식 (6), (7), (11)를 이용하면 식 (12)와 같다.

$$f_P(p) = -\frac{d}{dp} G_P(p) = \frac{\zeta}{\phi} G_P(p)$$

$$= \frac{1}{\phi} G_P(0) f_V\left(\frac{p}{\phi}\right) = \frac{1}{\phi} G_P(0) \zeta e^{-\zeta(p/\phi)} \quad (12)$$

이것은 월류확률  $G_P(0)$ 이 일치하는 값이 적용된 곳에서 두 가지 가정( $s_i = S_A, s_i = 0$ )에 모두 적용된다. 강우사상당 월류량의 기대값  $E[P]$ 는 다음과 같다.

$$E[P] = 0 \cdot p_P(0) + \int_{p=0}^{\infty} p f_P(p) dp = \int_{p=0}^{\infty} p \frac{1}{\phi} G_P(0) \zeta e^{-\zeta(p/\phi)} = \frac{\phi}{\zeta} G_P(0) \quad (13)$$

연평균 월류횟수( $n_s$ )를 연평균강우횟수( $\theta$ )와 강우사상의 월류확률( $G_P(0)$ ) 곱이므로

$$n_s = \theta G_P(0) \quad (14)$$

식 (14)을 이용하여 식 (9)과 (10)에서  $S_A$ 에 대하여 이항한 후 정리하면 다음과 같다.

첫째,  $s_i = S_A$ 이고  $IETD < S_A/\Omega$  일 경우

$$S_A = -\frac{\Omega\phi}{\psi\phi + \zeta\Omega} \ln\left\{ \frac{\phi}{\zeta} \left[ \frac{n_s}{\theta} \left( 1 + \frac{\zeta\Omega}{\lambda\phi} \right) \left( \frac{\psi}{\Omega} + \frac{\zeta}{\phi} \right) e^{\zeta S_i} - \frac{\psi}{\Omega} \right] \right\} \quad (15)$$

둘째,  $s_i = S_A$ 이고  $IETD \geq S_A/\Omega$ 인 경우와  $s_i = 0$ 인 경우에는 다음과 같다.

$$S_A = -\frac{\phi}{\zeta} \ln\left[ \frac{n_s}{\theta} \left( 1 + \frac{\zeta\Omega}{\lambda\phi} \right) \right] - \phi S_A \quad (16)$$

여기서, 저류지 만수위( $S_A$ )는 저류고로서, 저류용량으로 전환될 수 있으며, 이 값은 차집률( $\Omega$ )과 월류확률( $G_P(0) = n_s/\theta$ )의 함수가 된다. 한편 연평균 월류량(Average Annual Overflow Volume)  $P_u$ 는 연평균 강우사상의 횟수( $\theta$ )를 이용하여 산정된다.

$$P_u = \theta E[P] = \theta \frac{\phi}{\zeta} G_P(0) = \frac{\phi}{\zeta} n_s \quad (17)$$

### 2.3.3. 비점오염원 저류시스템분석

강우발생시 유역에서의 오염물질 유출특성은 침투농도, 산출평균농도, 침투 또는 평균 오염물질 부하량 또는 총유출부하량 등으로 나타낼 수 있다. 대부분의 경우 강우시 발생하는 총부하량이 개개의 농도 또는 침투부하량보다 중요하다. 이는 유출사상이 비교적 짧고 강우에 의한 유출이 유입되는 수체에서는 어느 정도의 혼합 현상으로 강우로 인한 유출수내 개개의 농도변화보다는 총부하량의 반응으로 나타나기 때문이다. 따라서 강우사상에 대한 평균농도 또는 유량가중평균농도(Event Mean Concentration: EMC)는 비점원 오염물질의 유출특성을 평가하는데 주요한 인자로

인식되고 있으며 널리 적용되고 있다. 본 연구에서도 유량 가중평균농도(EMC)를 이용하였으며 이는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$EMC \text{ (mg/L)} = \text{총 유출량중 총오염물질 중량} \div \text{총유출량} \quad (18)$$

이때 유역면적(A)에 따른 하천으로 월류되는 연간 총 오염부하량은 다음과 같다.

$$M_u = P_u \cdot EMC \cdot A \quad (19)$$

Fig. 4는 우천시에 합류식하수관거 토구에서의 거동을 모식도로 나타낸 것이다.

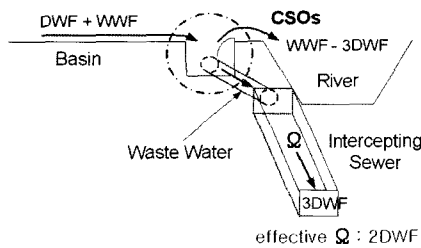


Fig. 4. Structure of combined sewer system for urban stormwaters.

건기 차집하수량 DWF(dry weather flow)은 해당지역 계획오수량을 사용하였다. 차집유량은 오수량의 3배로서 강우에 의한 유출량 WWF(wet weather flow)중 차집량 ( $WWF_{\text{captured}}$ )은 DWF의 2배이며 이 값은 저류지의 유효 차집률(effective  $\Omega$ )이 된다. 저류시설의 크기와 월류 확률의 관계를 나타내기 위한 강우에 의한 유출량 중 연평균 월류 비율  $R_s$ 는 다음과 같다.

$$R_s = \frac{P_u}{R}, \text{ 여기서 } P_u: \text{연평균월류량}, R: \text{연평균유출량} \quad (20)$$

따라서 유출량 중에서 차집되는 연평균 비율은 다음과 같다.

$$C_R = 1 - R_s = 1 - \frac{P_u}{R} \quad (21)$$

식 (21)를 식 (3)과 식 (18)를 조합하여 정리하면 다음과 같다.

$$C_R = 1 - G_p(0)e^{\zeta s_i} \quad (22)$$

식 (22)와 식 (14),(15),(16)을 이용하여 월류확률과 저류용량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

첫째,  $s_i = S_A$  and  $IETD < S_A/\Omega$  일 경우

$$S_A = -\frac{\Omega\phi}{\psi\phi + \zeta\Omega} \ln \left\{ \frac{\phi}{\zeta} \left[ (1 - C_R) \left( 1 + \frac{\zeta\Omega}{\lambda\phi} \right) \left( \frac{\psi}{\Omega} + \frac{\zeta}{\phi} \right) - \frac{\psi}{\Omega} \right] \right\} \quad (23)$$

둘째,  $s_i = S_A$  and  $IETD \geq S_A/\Omega$  or  $s_i = 0$  일 경우

$$S_A = -\frac{\phi}{\zeta} \ln \left[ (1 - C_R) \left( 1 + \frac{\zeta\Omega}{\lambda\phi} \right) \right] \quad (24)$$

위 관계에서 저류시설의 크기( $S_A$ )는 차집율(controlled outflow rate  $\Omega$ )과  $C_R$ 의 함수임을 알 수 있다. 본 연구에서는  $\Omega$ 를 일정하다고 가정하고  $C_R$ 과  $S_A$ 의 관계로부터 저류공간에 따른 하수의 하천월류량(CSOs)과 그에 따른 오염부하량을 산정하였다. 그리고 저류공간의 크기에 따른 유출율 및 오염부하량을 산출하고 월류 감소율에 따른 저류공간( $S_A$ )의 크기를 결정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 대상지역 현황 분석

대상유역은 구리시의 돌다리 분구로서 합류식 지역이며 오수는 인창천변에서 차집되며 우천시 3×DWF를 초과한 하수량은 인창천으로 월류되어 왕숙천으로 방류되고 있다. 인창천은 하류 6.5 km 구간이 복개하천으로 하천자정작용이 어려워 퇴적된 바닥침전물로 수질오염이 심각한 지역이다. 본 연구에서는 돌다리분구의 유출특성에 대하여 저류시설의 규모와 월류량 및 오염부하량을 산정하였다. Fig. 5 및 Fig. 6은 대상유역 위성사진 및 주요 하수관망체계를 나타내며 Table 2에 구리시 돌다리분구의 유역특성을 정리하였다.

#### 3.2. 강우특성

본 연구에서는 IETD결정 결과와 표준강우사상의 강우특성(권, 2003)과 유출특성(조 등, 2006b)에 대한 기존 연구성과로부터 월류량, 저류용량 등을 해석적 확률모형을 이용하여 산정하였다. 권(2003)은 서울지역의 IETD를 결정하기 위하여 1962~2002년의 42개년간의 시간강우 자료를 이용하여 autocorrelation 분석, 변동계수분석, 연강우 평균발생개수 분석 등으로 서울지역 IETD를 10시간으로 결정하였다. 연구지역인 구리시는 장기연속강우자료가 없으므로 인접한 서울지역 자료를 사용하였으며 강우특성은 장기간 동안의 관측 자료로부터 강우의 평균특성을 분석하는 것이므로 결과는 차이가 거의 없을 것으로 판단된다. 강우분석결과 표준강우사상의 강우특성값과 확률밀도함수의 적용을 위한 매개변수들은 다음 Table 3과 같다.

#### 3.3. 유출특성

유출특성은 IETD가 10시간인 표준강우사상의 통계특성

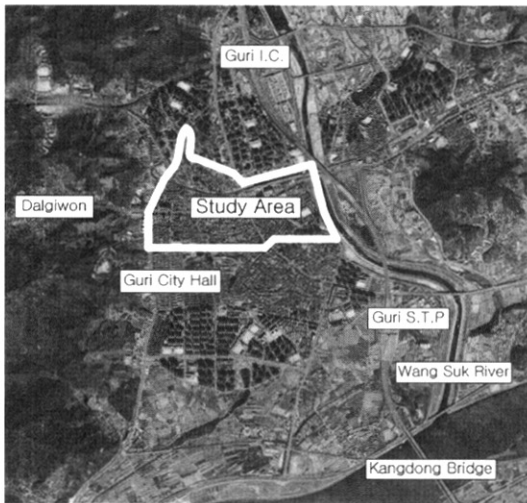


Fig. 5. Satellite maps of study area.

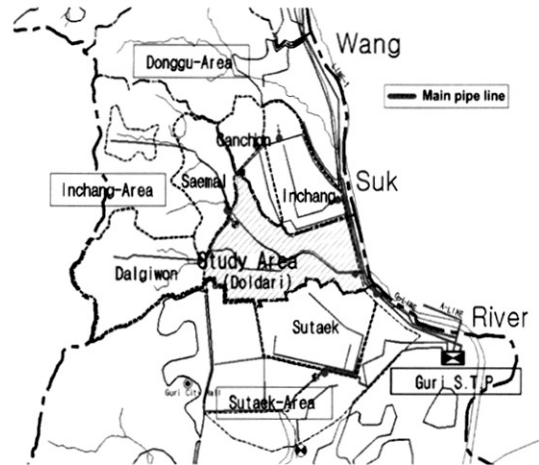


Fig. 6. Sewer system of study area.

Table 2. Summary of study area

Basin	Area (ha)	Runoff coeff.	Surface detention (mm)	EMC (mg/L)	Design sewage (m <sup>3</sup> /day)
Doldari	401.75	0.48	5.1	85.3	12789

Table 3. Rainfall characteristics and parameters of PDF

Items of characteristics	Rainfall characteristics	Parameters of PDF
Rainfall volume ( $\bar{v}$ )	23.061 mm	0.043( $C$ )
Rainfall duration ( $\bar{t}$ )	12.927 hr	0.077( $\lambda$ )
Interevent time ( $\bar{b}$ )	73.12 hr	0.014( $\psi$ )
Average rainfall intensity ( $\bar{i}$ )	1.784 mm/hr	0.561( $\beta$ )
Number of annual rainfall event ( $\theta$ )	48	-

Table 4. Runoff characteristics in study area

Items	Characteristics of study area	
Characteristics of study area	Runoff ratio. ( $\phi$ )	0.48
	Detention depth ( $S_d$ )	5.1 mm
Runoff characteristics	Average runoff of a event ( $v_r$ )	8.873 mm/event
	Annual average runoff ( $R$ )	425.91 mm/yr
	$Prob[V_r > S_d]$	80.16 %/event
	Annual times of runoff ( $n_r$ )	38 times/yr

들에 대하여 적용유역에서 분석된 유출특성을 이용하였다. 본 연구에서 적용한 평균유출량 등 유출특성은 Table 4에 나타내었다.

이상의 결과에서 보면 1년 평균 48회의 강우사상이 발생하였고, 이중에서 38회 정도가 유출되었고 나머지 10회는 지면저류 혹은 손실에 의해 유출되지 않은 것으로 나타났다. 또한 1회 평균 유출량은 약 8.9 mm로 강우로 인한 유출확률은 약 80.16%인 것으로 나타났다.

### 3.4. 수질관리를 위한 도시배수시스템분석

평상시 합류식관로에서 유출되는 오수량(DWF)과 유량가중평균농도(EMC)는 구리시의 계획오수량과 오염부하량농도(구리시, 2003)를 적용하였다. 계획오수량은 12,789 m<sup>3</sup>/day이고 유역면적 401.75 ha인 둘다리 분구의 DWF는 0.1326 mm/hr로서 강우로 인한 유출량(WWF)은 DWF의 2

배까지는 차집관로로 유입된다. Table 5에 둘다리분구에서 월류량과 횡수를 조절할 수 있는 저류공간이 설치되지 않는 상태에서 배수시스템의 거동과 유출 및 월류특성을 나타내었다.

연평균 48회의 강우사상이 발생했을 때 월류 횡수는 29회로 전체 강우사상의 약 60%가 하천으로 월류되는 것으로 나타났다. 양적으로는 둘다리분구의 연평균 유출량에 대하여 연평균 약 76%가 하천으로 월류되며, 우수토실 설계용량으로 보면, 강우시 총유출량의 24%정도는 차집되어 하수처리장으로 유입되고 있다. 연평균 월류량과 유량가중평균농도(EMC)를 이용하여 유역에서의 오염부하량을 분석하면 연간 111.35 ton가 하천 유입되는 것으로 나타났다.

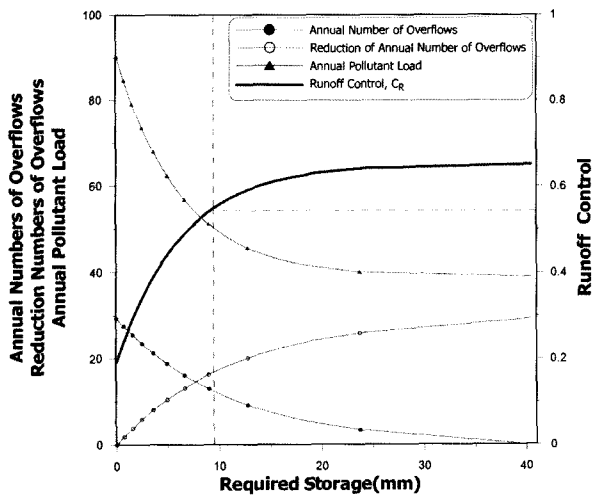
하천유입 오염부하량의 저감을 위한 저류지의 규모를 월류량조절율과 월류량 감소율 등에 대하여 분석한 결과를 Table 6 및 Fig. 7에 나타내었다.

**Table 5.** Runoff characteristics in drainage system of study area

Items	Characteristics	
Runoff of a rainfall event	WWF	8.873 mm/evt
Total amount of inflow in an intercepting sewer	3×DWF	0.3979 mm/hr/evt
Inflow of an intercepting sewer in total runoff	$WWF_{\text{tured}}(2 \times \text{DWF})$	0.2653 mm/hr/evt
Annual average runoff	$R$	425.91 mm/yr
Inflow of an intercepting sewer in annual average runoff	$WWF_{\text{tured}}$	100.74 mm/yr
Annual average inflow in an intercepting sewer	$WWF_{\text{tured}} + \text{DWF}$	1262.65 mm/yr
Prob. of overflow occurrence in a rainfall event	$G_p(0)$	0.612
Overflow volume in a rainfall event	$E[P]$	6.774 mm/event
Annual times of rainfall	$\theta$	48 times/yr
Annual times of overflow	$n_s$	29 times/yr
Annual average overflow volume	$P_u$	325.17 mm/yr
Annual average pollutant load	$M_u$	111.35 ton/yr

**Table 6.** Rate of CSOs reduction according to storage depth ( $S_A$ )

$S_A$ (mm)	Storage volume (m <sup>3</sup> )	Prob. of runoff $G_p(0)$	Runoff control ( $C_R$ )	Annual volume of overflows (mm/yr)	Number of overflows	Rate of reduction of overflows (%)
0	0	0.6120	0.000	325.17	29	0.00
1	4,018	0.5591	0.257	297.08	26	8.64
2	8,035	0.5108	0.315	271.42	24	16.53
3	12,053	0.4667	0.364	247.98	22	23.74
4	16,070	0.4264	0.406	226.56	20	30.33
5	20,088	0.3896	0.442	206.99	18	36.35
6	24,105	0.3559	0.473	189.11	17	41.84
7	28,123	0.3252	0.499	172.77	15	46.87
8	32,140	0.2971	0.521	157.85	14	51.46
9	36,158	0.2714	0.540	144.21	13	55.65
10	40,175	0.2480	0.556	131.76	11	59.48
11	44,193	0.2266	0.570	120.37	10	62.98
12	48,210	0.2070	0.582	109.98	9	66.18
13	52,228	0.1891	0.592	100.48	9	69.10
14	56,245	0.1728	0.601	91.80	8	71.77
15	60,263	0.1578	0.608	83.87	7	74.21
16	64,280	0.1442	0.614	76.62	6	76.44
17	68,298	0.1318	0.619	70.01	6	78.47
18	72,315	0.1204	0.624	63.96	5	80.33
19	76,333	0.1100	0.628	58.43	5	82.03
20	80,350	0.1005	0.631	53.39	5	83.58



**Fig. 7.** Design of storage depth ( $S_A$ ).

저류지의 시설규모는 처리시설과 처리효율을 고려해서 결정할 수 있으며 효율이 높을수록 처리용량은 증가하나, 시설비용이 많아진다. Fig. 7에서와 같이 저류시설은 일정 규모, 즉 일정 월류조절을 이상에서는 증가량에 비해서 오염부하량의 감소율이 현저히 작아지는 것을 고려하면 효율적인 저류시설의 용량 결정이 가능하다.

이때, 저류용량이 커짐에 따라  $C_R$ 값의 감소가 급격히 작아지는 55%에 대하여 저류용량을 결정한다면 Table 7과 같이 된다.

이때 월류량 감소율은 약 60% 정도이며  $C_R$ 값의 감소가 거의 없어지는 62.4%로 결정하는 경우 월류량 감소율은 약 80% 정도가 된다. 이때의 연간 월류량은 전체 비점오염원 유출량의 20%정도가 되는 것으로 해석될 수 있다.

**Table 7.** Design of storage to reduce pollutant load of CSOs

Basin	Area (ha)	Annual number of overflows	Runoff control ( $C_R$ )	Storage depth (mm)	Storage volume (m <sup>3</sup> )
Doldari	401.75	11	0.55	9.587	40,170

**4. 결 론**

본 연구에서는 해석적 확률모형을 이용하여 강우의 유출로 인한 비점오염원 유출량을 모의하였으며 차집량 및 월류량을 고려하여 CSOs 저류용적을 산정하는 절차를 제시하고 대상유역에 대하여 적용성을 검토하였다. 연구결과를 이용하면 도시유역에서 발생하는 강우로 인한 오염부하량의 유출량에 대하여 월류량조절을 감소폭선의 변곡으로부터 적절한 규모의 저류용량을 결정할 수 있으며, 또한 연간 허용월류량(1-월류량 감소율)에 대한 저류용량을 결정할 수도 있다. 본 연구결과는 합류식 하수관거가 설치되어 있는 도시유역의 저류지 설계에 적용할 수 있으며 장치형 처리시설의 경우는 강우로 인한 유출율이 결정되어야 하므로 추가적인 검증이 필요하다. 한편, 저류된 비점오염원의 유출량을 효율적으로 처리하기 위한 시스템의 연구와 장치형 처리시설의 용량산정 및 CSOs 처리를 위한 시스템의 선택과 효율적인 유지관리를 위한 연구가 계속되어야 할 것으로 판단된다.

**사 사**

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03 산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

**참고문헌**

구리시, 한강수계 하수관거 정비공사 기본설계보고서 (2003).  
 권재호, 비점오염원 산정을 위한 강우분석, 고려대학교 석사학위논문 (2003).  
 김건하, 권세혁, 농지·임야유역의 비점원 발생 BOD 부하의 추정, *한국물환경학회지*, **21**(6), pp. 617-623 (2005a).  
 김건하, 금강유역 비점원에서 발생하는 미생물 오염 및 수질에 대한 영향, *한국물환경학회지*, **22**(3), pp. 504-512 (2006).  
 김이형, 이선하, 주차장 및 교량지역의 강우유출수내 비점오염물질의 특성 비교 및 동적 EMCs, *한국물환경학회지*, **21**(3), pp. 617-623 (2005b).  
 유병로, 정승권, 전계원, 공간정보를 이용한 분포형 유역 수질 모의, *한국수자원학회 논문집*, **37**(11), pp. 897-913 (2004).  
 조덕준, 위험도 기반 지역별 정규 CSOs 곡선 설계에 관한 연구, *한국수자원학회 논문집*, **39**(7), pp. 578-581 (2006).  
 조덕준, 김건하, 소규모 도시유역 합류식 하수관거 월류수 특성화 및 최적 저류지 용량결정, *한국물환경학회지*, **22**(2), pp. 314-320 (2006a).  
 조덕준, 김명수, 이정호, 김중훈, 연속 강우-유출 모의기법을 이용한 최적 CSOs 산정에 관한 연구, *한국물환경학회지*, **22**(6), pp. 1068-1074 (2006b).  
 한국수도협회, *하수도시설기준* (1998).  
 Adams, B. J., Fraser, H. G., Howard, C. D. D. and Hanafy, M. S., Meteorological Data Analysis for Urban Drainage System Design, *Journal of Environmental Engineering*, **112**(5), pp. 827-848 (1986).  
 Adams, B. J. and Papa, F., Urban Stormwater Management Planning with Analytical Probabilistic Models HOHN WILEY & SONS, INC. (2000).  
 Eagleson, P. S., Dynamics of Flood Frequency, *Water Resources Research*, **8**(4), pp. 878-897 (1972).