

# 도시유역에서 공간적으로 분포된 소규모 강우유출수 관리시설의 최적설치위치선정

김상단<sup>†</sup> · 임용균<sup>\*</sup> · 김진관<sup>\*\*</sup> · 강두기<sup>\*\*\*</sup> · 서성철<sup>\*\*\*\*</sup> · 이재관<sup>\*\*\*\*\*</sup>

부경대학교 환경공학과  
<sup>\*</sup>부산대학교 사회환경시스템공학과  
<sup>\*\*</sup>고려대학교 건축사회환경시스템공학과  
<sup>\*\*\*</sup>(주) 웨스  
<sup>\*\*\*\*</sup>한국환경공단 수생태시설처  
<sup>\*\*\*\*\*</sup>국립환경과학원 낙동강 물환경연구소

## Best Site Identification for Spatially Distributed On-Site Stormwater Control Devices in an Urban Drainage System

Sangdan Kim<sup>†</sup> · Yong Kun Lim<sup>\*</sup> · Jin Kwan Kim<sup>\*\*</sup> · Dookee Kang<sup>\*\*\*</sup> · Seongcheol Seo<sup>\*\*\*\*</sup> · Jae Kwan Lee<sup>\*\*\*\*\*</sup>

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University  
<sup>\*</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University  
<sup>\*\*</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Korea University  
<sup>\*\*\*</sup>Water & Environmental Management System Corporation (WEMS)  
<sup>\*\*\*\*</sup>Department of Ecosystem Facility, Korea Environment Corporation  
<sup>\*\*\*\*\*</sup>Nakdong River Environmental Research Center, National Institute of Environmental Research  
(Received 12 August 2010, Revised 2 September 2010, Accepted 7 September 2010)

### Abstract

Spatially distributed on-site devices such as bioretentions and bioboxfilters are becoming more common as a means of controlling urban stormwater quality. One approach to modeling the cumulative catchment-scale effects of such devices is to resolve the catchment down to the scale of a land parcel or finer, and then to model each device separately. The focus of this study is to propose a semi-distributed model for simulating urban stormwater quantity and identifying best sites for spatially distributed on-site stormwater control devices in an urban drainage system. A detailed model for urban stormwater improvement conceptualization simulation is set up for a 0.9342 km<sup>2</sup>.

**keywords** : Nonpoint source, On-site stormwater control device, Stormwater management model, Urban hydrology, Water quality

## 1. 서론

비점오염원 관련 전문가들은 부족한 예산, 제한된 자원 그리고 불완전한 정보에 의해 도시개발에 따른 비점오염원의 영향평가 및 비점오염원의 저감방안 수립에 현실적인 제한을 받고 있다. 이러한 측면에서 수학적 모형화는 비점오염원 저감을 위한 여러 가지 의사결정을 위해 필요한 정보를 제공하는데 거의 유일한 대안이 되고 있다. 즉, 도시개발에 따른 비점오염원의 영향을 평가하는 것이라든지 아니면 비점오염원의 적절한 관리 대안의 효과를 따져보기 위해서도 모의 모형의 사용은 정책 결정을 위한 매우 중요한 정보를 생산하게 된다(Perez-Pedini et al., 2005).

현재 우리나라에서 가장 많이 사용되고 있는 비점오염원 모의 모형은 SWMM(StormWater Management Model)이라

할 수 있다. SWMM은 초기에는 도시유역의 강우에 의한 홍수량을 산정하기 위하여 1971년 미국 EPA(Environmental Protection Agency)의 지원 아래 Metcalf & Eddy사가 개발한 모형으로서, Florida 대학 및 WRE(Water Resources Engineers)의 공동연구에 의하여 도시유역 하수시스템내의 유량과 수질을 모의할 수 있도록 구성되어 있다. 추후 EPA SWMM은 도시유역에서 강우로 인해 발생하는 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에 대한 유출량 추적, 저류지 모의, 오염물질에 대한 처리와 비용계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형으로 발전하여, 소규모 배수유역에서 대규모 배수유역까지의 적용이 가능하고, 배수유역 내 각종 수리시설물을 동시에 고려할 수 있으며, 인위적인 배수체계를 가진 도시지역에서 소유역의 토지이용을 고려하여 다양한 오염물질의 농도를 예측하는 것이 가능하다(Jang et al., 2007). EPA SWMM은 편리한 그래픽 사용자 인터페이스, 도지지역 유량 및 수질 동시 모의 가능, 지표면에서의 비점오염원 축적 및 쓸림 모의 가능 등 많은 장점을 가지고 있는

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
skim@pknu.ac.kr

반면에, 기본적으로 lumped 모형이므로 우리나라 도시지역(특히, 구시가지)과 같은 복잡한 토지이용패턴의 구현이 불가능하며, 비점오염원의 배출경로가 명확하게 구현되지 않음에 따라 배수분구 출구에 위치한 대규모 저감시설 이외의 소규모 분산형 비점오염원 저감시설의 효과를 파악하기 어려워 최근 관심이 되고 있는 공간적으로 분포된 소규모 분산형 비점오염원 저감시설에 대한 효과분석 및 최적 설치 위치 선정 등에 적용이 사실상 불가능하다는 문제점이 있다(Bosley, 2008; Carter and Jackson, 2007; Elliott et al., 2001; Kertesz et al., 2007; Warwick and Litchfield, 1993).

최근 Low Impact Development(LID)를 비롯하여 도시화에 따른 영향을 최소한으로 하면서 도시를 개발하고자 하는 개념이 많은 전문가들 사이에서 관심을 받고 있는데(장수형 등, 2008; 전지홍 등, 2009; 최치현 등, 2010; Prince George's County, 1999), 이를 비점오염원 관리의 입장에서 정리해보면 새롭게 조성되거나 기존 도시의 재개발 시에 생태저류지를 포함한 침투기반의 저류지, 침투 트렌치, 옥상녹화, 식생수로 등과 같은 다양한 분산형 소규모 비점오염원 저감시설들을 설치하여 강우의 차집, 침투 및 증발산의 증진을 통하여 강우유출수의 양을 저감함에 따라 비점오염원의 배출량을 저감시키고자 하는 것이다(Elliott et al., 2009). 이와 같은 분산형 시설들에 대한 여러 가지 설계 지침들이 제안되어 있으나(Maryland Department of the Environment, 2000), 배수분구 전체를 대상으로 이러한 분산형 시설들의 누적된 효과를 평가할 수 있는 방법론은 아직까지 명확하게 정립되어 있지 못한 실정이다(Kaini et al., 2007). 이러한 측면에서도 기존의 SWMM으로 해결되지 못하는 문제점들에 대한 대안 마련이 요구된다고 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 도시배수분구에서 소규모 분산형 비점오염원 저감시설 설치 시의 효과를 살펴보기 위한 모의모형을 구축한 후, 이러한 시설을 설치하고자 할 때 최적 우선순위위치를 선정하고자 한다. 이를 위해 제안된 모형은 우리나라 도시지역(특히, 구시가지)과 같은 복잡한 토지이용패턴의 구현 및 비점오염원의 배출경로가 모형 구조에 반영된 래스터 기반의 준분포형 강우-비점오염원 유출 모형의 형태를 가지고 있으며, 지표면에서의 비점오염원 축적 및 쓸림 현상을 구현함으로써 도시지역 유량 및 수질을 동시에 모의하면서 초기우수 효과도 고려할 수 있도록 구성된다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 모형개발의 기본방향

컴퓨터 기능의 향상 및 DB의 질적 향상에 기인하여 많은 분포형 강우-비점오염원 유출모형이 개발되어 왔으며, 다양한 수학적 해석기법과 추상적 개념을 도입하여 복잡한 배수분구의 수문과정을 모형화하는 연구가 진행되어 왔다. 이 중 NRCS 유출곡선방법(SCS, 1986)은 다른 강우-유출모형과는 달리 토지이용변화를 효과적으로 표현할 수 있으며, 우리나라의 경우에도 다른 강우-유출모형과는 달리 토지이용상태별 유출곡선번호(Curve Number, CN)에 대한 연구가

비교적 잘 정립되어 있어 도시 개발에 따른 강우유출수의 증감을 재현하는데 효율적이다. 이에 본 연구에서는 도시지역을 기반으로 하여 준 분포형 비점오염원 유출 모의모형을 구성하고, 이를 통하여 소규모 분산형 비점오염원 저감시설의 설치 시의 최적설치우선순위의 선정 및 효과를 정량화하고자 한다.

본 연구에서는 일반적인 GIS 소프트웨어와 비교적 간단한 입력 자료를 가지고 효과적으로 배수분구의 비점오염원 유출 특성을 구현하도록 모형을 구성하고자 하였으며, 배수분구를 적절한 길이(본 연구에서는 30 m)를 가진 정방형의 셀(cell)로 분할하게 된다. 분할된 각 셀 사이에서의 흐름은 팔방흐름알고리즘(O'Callaghan and Mark, 1984)을 이용하여 인접한 8개의 셀 중 가장 낮은 곳으로 흐르도록 구성된다. 셀을 통한 유출, 즉 지표면에서의 유출은 크게 강우 발생 시 NRCS-CN 유효유량 산정방법에 의거하여 침투되는 수량과 지표면을 통해 흐르는 강우유출수로 구분된다. 또한, 일정한 수 이상의 셀들이 합산되어 모이는 셀의 경우에는 흐름 셀로 규정하여 관거 또는 하천에서의 흐름이 구현되도록 구성되어 있다. 비점오염원 유출모의의 경우에는 무강우 시에 지표면에 오염물질이 쌓이는 축적과정과 강우유출수 발생 시에 지표면에 축적된 오염물질의 쓸림 현상을 반영할 수 있도록 하였다.

### 2.2. 모형의 기본입력 자료

제안된 모형에서 도시배수분구는 30 m × 30 m 크기의 셀 단위로 구성되며, 이때 고려해야할 특성과 모형화를 위해 특성화된 각 셀의 주요한 물리적인 특성은 아래와 같다.

- ① 강우는 공간적으로 균등하게 분포한다.
- ② 각각의 셀 내부는 동일한 지표면 특성을 갖는다.
- ③ 각 셀에서의 지표면 흐름은 인근 8개 셀 중 가장 낮은 셀로 모두 유입되며, 다른 셀로는 유입되지 않는다.
- ④ 배수분구 내에서의 유출은 지표면 유출로 구성된다.
- ⑤ 수로 및 관거 내 저류의 영향은 무시된다.
- ⑥ 셀에서 셀로의 흐름 속도는 지표면 유출과 하천유출로 나누어 모의된다.

위 사항에 덧붙여서 모형 구동에 필요한 셀의 주요한 특성인자는 다음과 같다.

- ① 셀의 크기 (본 연구에서는 30 m × 30 m)
  - ② 고도(elevation)
  - ③ 유출방향 (상/하/좌/우/상좌/상우/하좌/하우 중 한 방향, 팔방흐름모형)
  - ④ 토양특성
  - ⑤ 토지이용특성
  - ⑥ CN값
  - ⑦ 지표면 유출과 하천유출을 나누는 흐름누적 셀들의 개수
- 이 외에 제안된 모형의 구동에 필요한 기상자료는 장기간의 시간 강우자료이며, 도시배수분구의 지표면 유출을 통하여 비점오염원이 배출되므로 증발산 관련 현상 및 지하수 유출 현상은 고려하지 않는 것으로 한다.

2.3. 비점오염원 유출 모의의 물리적 주요 과정

셀별 지표면 유출은 NRCS-CN 방법에 의거하여 시간 강우자료로부터 시간별 유효우량을 계산한다.

각 셀에서의 도달시간은 강우가 지표면을 통해 이동하여 하천이나 우수관거까지 도착하는데 걸리는 시간인 유입시간(inlet time)  $t_o$ 와 하천이나 우수관거를 통해 유역의 출구 지점까지 흐르는데 걸리는 시간인 유하시간(flow time)  $t_f$ 의 합으로 결정된다. 각 셀에서의 유입시간은 식 (1)과 같이 Kerby 공식으로 산정되며, 각 셀에서의 유하시간은 경사별 유속을 고려한 Kraven 공식(식 (2))으로 산정된다 (Corbitt, 1999; Wanielista et al., 1997).

$$t_o = 36.264 \left( \frac{L_o^{1.5} \cdot n}{H^{0.5}} \right)^{0.467} \tag{1}$$

$$t_f = 16.667 \frac{L_f}{V} \tag{2}$$

여기서  $t_o$ 는 유입시간(min), 식 (1)에서의  $L_o$ 는 강우유출수의 지표면 이동거리(km),  $H$ 는 표고차(m),  $n$ 은 Kerby의 조도계수이며,  $t_f$ 는 유하시간(min), 식 (2)에서의  $L_f$ 는 해당 셀에서의 강우유출수가 하천이나 우수관거에 도착한 후, 배수분구 출구까지 흐르는 이동거리(km)이며, 유속  $V$ 는 강우유출수의 이동경로에 따른 경사  $S$ 에 따라서  $S \leq 1/200$ 인 경우에는  $V = 2.1\text{m/sec}$ ,  $1/200 < S < 1/100$ 인 경우에는  $V = 3.0\text{m/sec}$ ,  $S \geq 1/100$ 인 경우에는  $V = 3.5\text{m/sec}$ 가 각각 적용된다. 최종적으로 배수분구 전체의 도달시간은 위와 같이 계산된 각 셀별 도달시간 중에서 가장 큰 값으로 결정한다. 다만, 도달시간을 산정하는 방법은 본 연구에서 제시한 방법 이외에도 다양한 방법이 존재하기 때문에 추후 모형 내에서 여러 방법 중 하나를 선택하도록 모형을 구성하는 것도 고려해볼만한 사항이라 판단된다.

각 셀에서의 지표면 흐름은 인근 8개 셀 중 가장 고도가 낮은 셀로 모두 유입되며, 다른 셀로는 유입되지 않게 된다. 따라서 배수분구 상류의 셀들 일수록 배수분구 하류의 셀들을 경유하여 강우유출수를 배수분구의 출구로 이송시키게 된다. 이 때, 셀의 이송특성을 지표면 유출과 하천 유출로 구분할 수 있으며 구분의 기준인 최소 하천흐름누적셀 개수는 얼마나 많은 상류 셀들의 강우유출수가 해당 셀을 경유하여 하류로 이송되는 가로 결정된다. 따라서 상류 셀로부터의 흐름누적 셀 개수가 최소 하천흐름누적셀 개수이하인 경우에는 지표면 유출 셀로, 초과하는 셀의 경우에는 하천 흐름 셀로 규정하여, 도달시간 산정 시 지표면 유출 셀을 통하여 이송되는 강우유출수는 Kerby 공식에 의하여 유입시간으로 계산되며, 하천 흐름 셀을 통하여 이송되는 강우유출수는 흐름경사별 유속이 고려된 Kraven 공식에 의하여 유하시간으로 계산된다.

모형화의 관점에서 강우유출수를 통한 비점오염원의 유출과정은 크게 두 가지 현상으로 구분된다.

- 1) 지표면 위로 오염물질의 축적
  - 2) 강우유출수 발생 시 축적된 오염물질의 쓸림
- 강우유출수 사상이 발생하기 전에 지표면에 축적되는 비점오염물질의 양은 아래와 같이 모의된다(Behera et al., 2006).

$$P_b = M(1 - e^{-N_c b}) \tag{3}$$

여기서  $P_b$ 는 직전 선행 강우사상의 종료 후  $b$ 시간이 지났을 때의 단위면적당 비점오염물질의 축적량( $\text{kg}/\text{km}^2$ ),  $M$ 은 최대가능 축적량( $\text{kg}/\text{km}^2$ ),  $N_c$ 는 축적을 계수( $1/\text{hour}$ )이다.

상기와 같이 무 강우기간 동안에 지표면에 축적된 비점오염물질은 강우유출수 사상이 발생하면 강우유출수와 함께 씻겨 배수분구 출구로 이송된다. 강우기간 동안에 씻기는 비점오염물질의 양은 주로 강우유출수의 양과 강우지속기간의 합수로 표현될 수 있다. 강우유출수의 양이 많을 경우보다 많은 양의 축적된 비점오염물질이 이송될 것이며, 강우유출수가 지속적으로 발생된 지 일정시간이 지나 강우발생 이전에 지표면에 쌓인 오염물질이 모두 씻겨나갔다면 더 이상 강우유출수와 함께 비점오염물질의 배출이 일어나지 않을 것이다. 또한 도시 배수분구에서의 강우유출수의 유출은 거의 순간적으로 일어나기 때문에 지표면의 어느 지점에서 기원된 비점오염물질이 배수분구 출구까지 이송되면서 일어나는 생화학적 반응은 무시 가능할 것으로 판단하였다. 따라서 비점오염물질의 씻김 량은 아래와 같이 구성된다 (Behera et al., 2006; Segarra-Garcia and Loganathan, 1992).

$$l = P_b(1 - e^{-Kv_r t}) \tag{4}$$

여기서  $l$ 은 시간  $t$ 에 단위면적당 씻기는 비점오염물질의 양( $\text{kg}/\text{m}^2$ )이고,  $v_r$ 은 시간  $t$ 에 발생된 강우유출수의 양( $\text{mm}$ )이며,  $K$ 는 씻김 계수( $1/\text{mm}$ )이다.

다만, 오염물질의 축적과 쓸림 과정에 대한 모의방법은 본 연구에서 제시한 방법 이외에도 다양한 방법이 존재하기 때문에 추후 모형 내에서 여러 방법 중 하나를 선택하도록 모형을 구성하는 것도 고려해볼만한 사항이라 판단된다. 모형화 과정의 전체적인 모식도를 Fig. 1에 도시하였다.

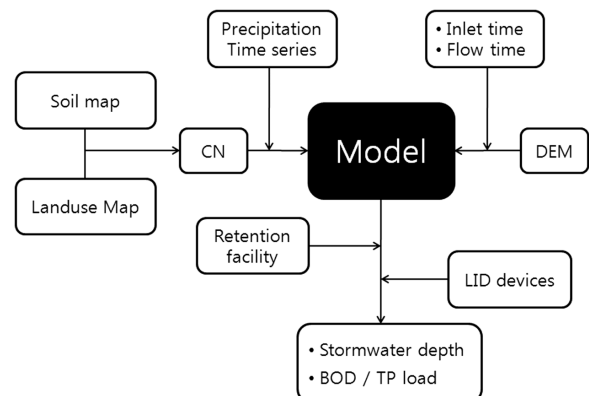


Fig. 1. Model schematic diagram.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 연구대상지역의 특성

연구대상지역으로는 J시 N배수분구(배수분구면적 0.9342 km<sup>2</sup>)를 선정하였다(Fig. 2). N배수분구의 토지이용현황을 살펴보면 대부분이 주거지역과 상업지역으로, 도시개발로 인한 도로·주차장 등을 포함한 도시적 토지이용면적이 배수분구의 대부분을 차지하고 있으며, 향후 주변 도시개발 계획이 반영되면 추가적인 도시화·산업화로 불투수율이 증가하고 교통량이 늘어남에 따라 강우 시 유출수량 및 비점오염원 축적량이 증가하여 비점오염원에 의한 부하량이 높게 나타날 것으로 판단된다.

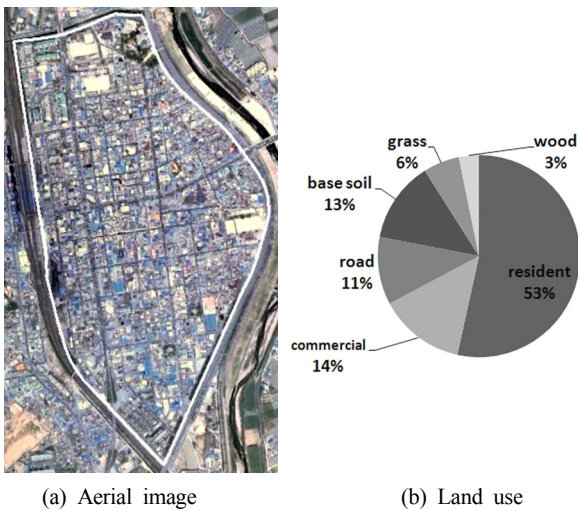


Fig. 2. N urban drainage catchment.

N배수분구의 수계오염총량관리기술지침에 따른 토지계층 발생부하량은 BOD의 경우에는 73.1 kg/day, TP는 1.79 kg/day로 각각 산출된다.

#### 3.2. 모형 적용을 위한 주요 매개변수 산정

먼저 배수분구의 도달시간 산정을 위해서는 최소 하천흐름누적 셀 개수를 결정하여야 한다. 본 연구에서는 이 값을 다양하게 바꾸어 가며 배수분구의 도달시간을 계산하였으며, 반복 계산결과 비교적 수렴되는 결과를 주는 최소 하천흐름누적 셀 개수 50으로 설정하였고(Fig. 3), 그에 따른 하천흐름셀을 표시하여 Fig. 4에 도시하였다. 최종적으로 배수분구의 도달시간은 81분으로 결정되었으며, Fig. 5에 각 셀별 도달시간을 도시하였다. 즉, 본 연구에서 제안된 모형은 도달시간을 유입시간과 유하시간으로 나누어 모의하였으며, 그에 따라서 지표면 흐름셀에 떨어진 유효강우의 도달시간은 지표면을 따라 하천흐름셀까지 유입되는데 걸리는 시간과 하천흐름셀부터 유역출구까지 유하하는데 걸리는 시간으로 나누어 모의된다.

비점오염원의 축적과 쓸림을 모의하기 위한 매개변수는 축적과 관련하여  $M$ 과  $N_c$ , 쓸림과 관련하여  $K$ 가 있다. 본 연구에서는  $M$  값을 선정하기 위하여 수계오염총량관리기

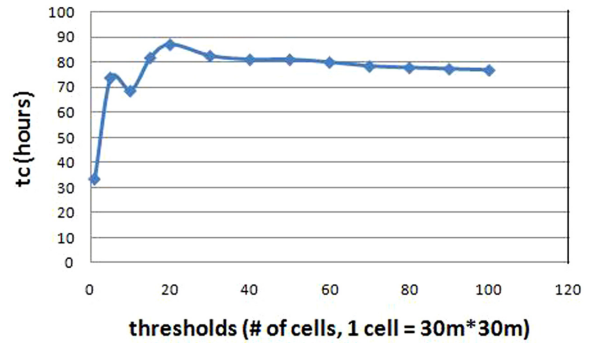


Fig. 3. Estimation of minimum cumulative number of cells for stream flow.

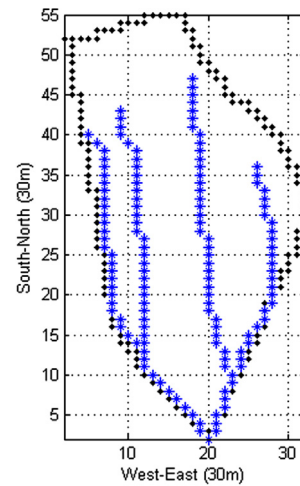


Fig. 4. Assignment of stream flow cells.

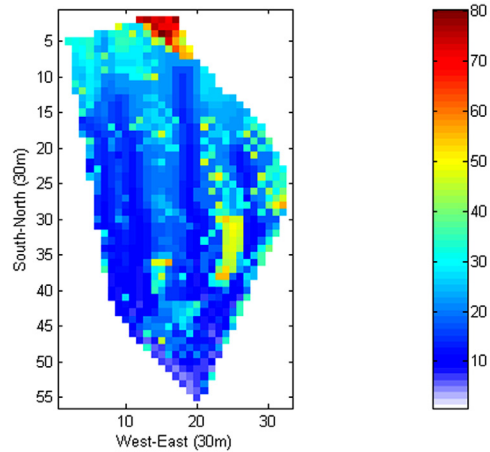


Fig. 5. Concentration time (min).

술지침에 의거하여 최대가능 축적량을 토지이용패턴별(일반주거지, 아파트, 상업지, 교통, 나지, 초지, 산림), 대상오염물질별(BOD, TP)별 발생부하량에 1개월의 무 강우시간이 주어지는 것을 가정하여 각각의 셀별로 산정하였다. 축적률 계수는 Behera 등(2006)의 연구에 따라서 BOD의 경우 0.0133(1/hour)를, TP의 경우 0.0110(1/hour)를 각각 적용하였다. 씻김계수의 선정을 위해서 본 연구에서는 장기적으로는 수계오염총량관리기술지침에 의거한 토지계 원단위

발생부하량이 모두 배출된다고 가정하여 그에 합당한 씻김 계수를 시행착오적으로 찾아 이후 분석을 실시하였다. 즉, BOD의 경우에는  $K=0.2356$ 을, TP의 경우에는  $K=0.3766$ 을 적용하였으며, 이는 각각 평균적인 강우유출수 유출이 발생하였을 때 지표면에 잔존해 있는 비점오염물질의 20%와 30%가 쓸려 배출되는 정도의 값이다.

**3.3. 비점오염원 유출모의결과**

N배수분구 인근의 기상청 청주지점의 2000년 1월 1일부터 2009년 12월 31일까지 최근 10년간의 시간 강우자료를 이용하여 10년간의 강우유출수 및 비점오염원 유출을 모의하였다. Fig. 6에 강우사상별 강우유출수 수량을 도시하였으며, Fig. 7에는 강우유출수 유출량에 따른 비점오염원 배출부하량의 관계를 나타내었다. Fig. 6과 7로부터 같은 강우량이 발생하더라도 선행토양수분에 따라 강우유출수의 발생량이 다르게 모의되고 있음을 알 수 있으며, 같은 양의 강우유출수가 발생하더라도 사전에 지표면에 축적된 오염물질의 양에 따라서 오염물질의 배출부하량이 다르게 계산되고 있음을 파악할 수 있다. 참고로 Fig. 8은 배수분구 말단부에 환경부 비점오염원 저감시설 용량기준인 5 mm의 저류지를 설치하였을 경우에 특정 강우사상에 대한 강우유출수 및 BOD, TP의 배출부하량을 모의결과를 보여주고 있다. 이 때, 저류지의 강우유출수 처리효율은 BOD와 TP 모두 70%로 가정하여 모의하였다. 5 mm 저류지를 설치하였을 경우의 설치 효과를 살펴보면, 청주지점 최근 10년간 연평균 강수량 1,248 mm기준으로 볼 때 강우유출수의 경우 설치 전 536 mm에서 설치 후 433 mm로 총량 기준으로 약 19% 정도의 차집효율을 보였으며, BOD 및 TP의 경우 각각 54% 및 59%의 저집효율을 보이고 있는 것으로 분석되었다.

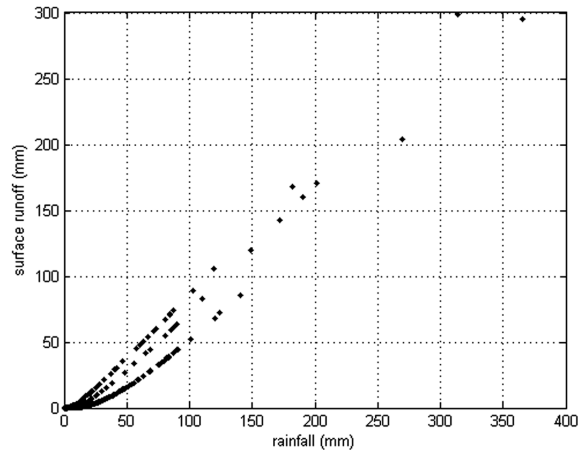


Fig. 6. Rainfall - stormwater runoff relation.

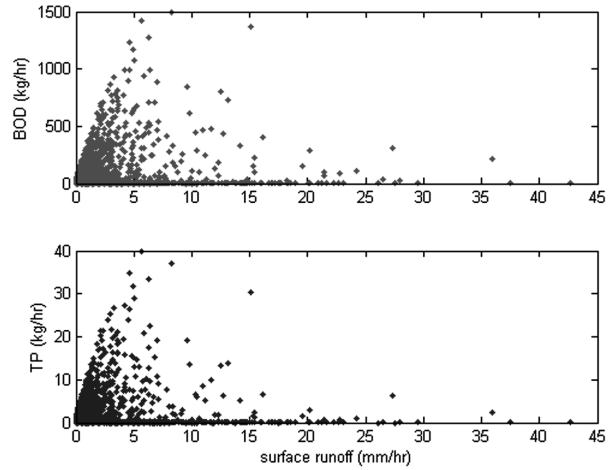


Fig. 7. Relationship between stormwater runoff and nonpoint source loads.

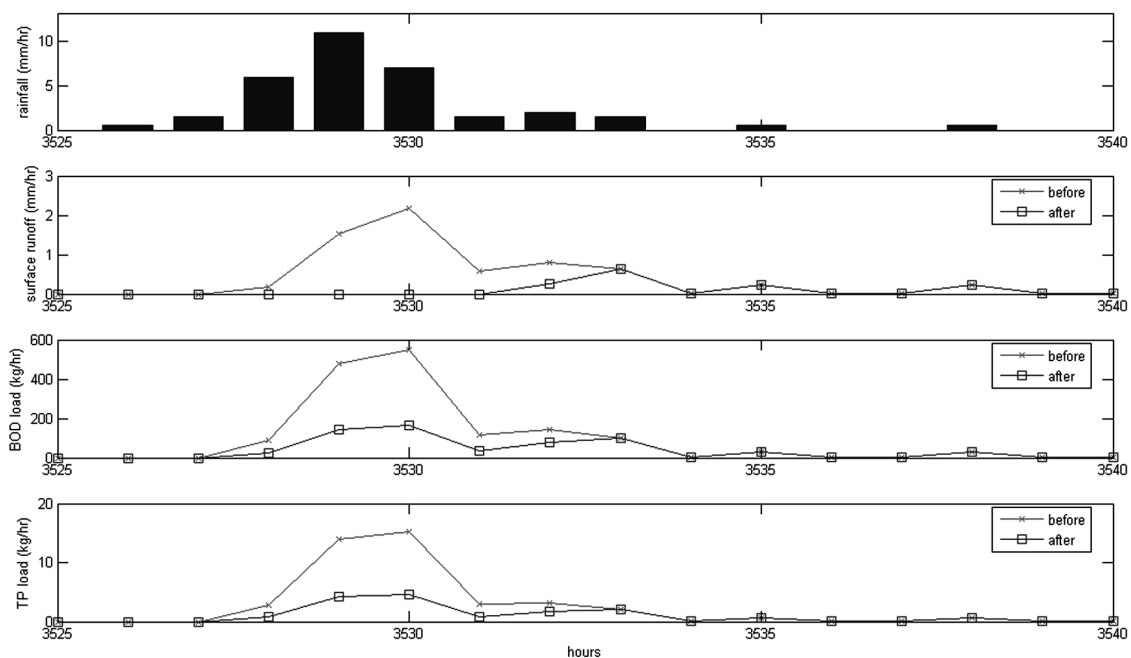


Fig. 8. Event modeling example (2000/5/26/21:00 - 2000/5/27/12:00).

### 3.4. 소규모 분산형 비점오염원 저감시설 설치 위치 및 저감효율 계산

소규모 분산형 비점오염원 저감시설은 빈번하게 발생하는 강우유출수의 양을 배수분구 전체에서 분산적으로 저류 시킴으로서 강우유출수의 유출속도 저감과 비점오염원 배출량 저감을 도모하게 된다. 또한 생태적인 저류기능을 통하여 물리적, 화학적, 생물학적으로 오염물질을 제거하는 기능을 수행한다. 매우 다양한 종류의 소규모 분산형 비점오염원 저감시설이 존재하며, 각 시설별로 강우유출수의 차집능력 및 비점오염원 저감효율이 매우 상이하므로, 본 연구에서는 최소한의 강우유출수 차집능력 및 비점오염원 저감효율을 적용하였다. 배수구역 전체를 30 m × 30 m의 정방형 셀로 분할한 후, 각 셀 말단부에 1개의 소규모 분산형 비점오염원 저감시설이 설치될 때, 2 mm × 30 m × 30 m의 강우유출수를 차집하는 것으로 설계하였다. 차집된 강우유출수는 전량 다시 유출되는 것으로 가정하였으며, 이때 유입된 BOD와 TP 부하량의 50%가 처리되는 것으로 가정하였다.

배수구역의 모든 셀에 소규모 분산형 비점오염원 저감시설이 설치되는 것은 현실적으로 불가능하므로, 1개소부터

1,038개소의 소규모 분산형 비점오염원 저감시설의 설치 시 비점오염원 저감효율을 분석하였으며, 각각의 설치 시설 개소별 최적우선설치위치를 설정하였다. Fig. 9에 소규모 분산형 비점오염원 저감시설을 각 셀별로 설치하였을 경우 각 셀별 배수분구 출구에서의 비점오염원 배출 저감효과를 도시하였으며, Fig. 10은 소규모 분산형 비점오염원 저감시설을 80개소 및 160개소 설치 시에 BOD에 대한 설치 개소별 최적설치우선위치를 보여주고 있다. Fig. 10의 최적설치우선위치는 Fig. 9에 도시한 바와 같이 소규모 분산형 비점오염원 저감시설을 각 셀별로 설치하였을 경우 비점오염원 저감 효율이 가장 좋은 셀을 우선적으로 선택하도록 하였다. Fig. 11에는 소규모 분산형 비점오염원 저감시설 최적설치에 따른 설치 개소별 누적 비점오염원 배출 저감효과를 도시하였다. 참고로 80개소 설치 시에 BOD 및 TP 부하량은 설치 전 대비 각각 3.2% 및 4.0% 정도 감소하였으며, 160개소 설치 시에는 각각 5.9% 및 7.3%의 BOD 및 TP 부하량 저감효과를 얻을 수 있는 것으로 분석되었다. 이러한 분석결과는 주어진 예산에 따른 최적효과를 기대할 수 있는 소규모 분산형 비점오염원 저감시설의 위치 및 그 효과를 정량화하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

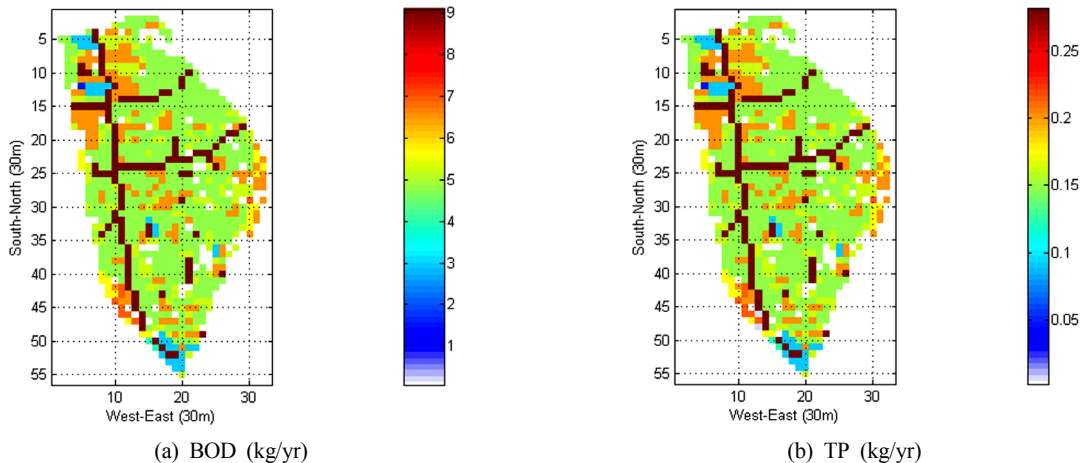


Fig. 9. Reduction of Nonpoint source load with on-site stormwater control device.

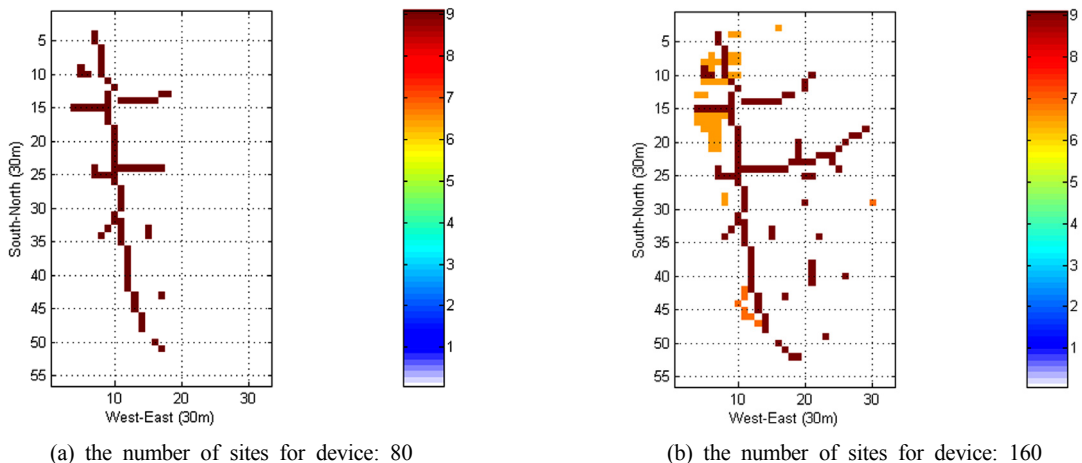


Fig. 10. Best site identification for on-site stormwater control device (with BOD).

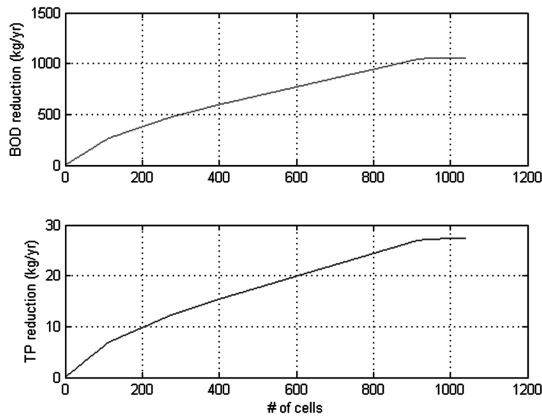


Fig. 11. Annual load reduction with respect to the number of devices.

### 4. 결론

도시지역 강우유출수의 수질관리를 위해서 생태저류지 또는 식생필터와 같은 분산형 소규모 비점오염원 저감시설에 대한 관심이 점점 높아지고 있다. 위와 같은 시설들이 누적되어 배수분구 전체 차원에서 효과를 정량화하기 위한 접근방법 중의 하나는 배수분구를 일정한 해상도로 분할한 셀들로 나누어 각각의 시설들을 하나하나 모형화하는 것이다. 본 연구에서는 이를 위하여 셀 기반의 준 분포형 강우-비점오염원 유출 모형을 제안하였다.

제안된 모형에서는 우리나라 도시지역(특히, 구시가지)과 같은 복잡한 토지이용패턴의 구현과 비점오염원의 배출경로를 반영하고자 하였으며, 도시지역 유량 및 수질의 동시모의, 지표면에서의 비점오염원 축적 및 쓸림 모의 등이 가능하도록 구성하였다. 이에 따라서 배수분구 말단의 저류지 설치에 따른 효과 분석뿐만 아니라 배수분구 전역을 대상으로 한 분산형 소규모 비점오염원 저감시설의 최적 위치 및 효과를 나타내 보고자 하였다.

제안된 모형의 주요 특징을 살펴보면, 먼저 현재 우리나라에서 비교적 손쉽게 획득할 수 있는 지형속성정보들(DEM, 토양도, 토지이용도)을 대상으로 Arc-View와 같은 일반적인 GIS 소프트웨어를 이용하여 비점오염원 유출모형 실행을 위한 입력 자료를 구축하도록 하였다. 따라서 지형속성정보들을 별다른 처리작업 없이 손쉽게 text파일의 형태로 저장하여 제안된 모형의 입력 자료로 사용이 가능하다. 두 번째로는 각 셀별(본 연구의 경우 30 m × 30 m 해상도)로 NRCS 유출곡선법에 기초한 강우-유출 모형을 적용함으로써 강우사상이 발생하기 전에 선행 무 강우시간에 따른 토양함수조건의 고려가 가능하다는 점이다. 따라서 시간적으로 공간적으로 변하는 지표면의 특성이 잘 반영될 수 있도록 하였다. 따라서 시기별 비점오염원 유출패턴의 변동성을 분석할 수 있으며, 배수분구 일부 지역의 개발 시 또는 수질관리 대안 설치 시의 영향을 보다 용이하게 분석할 수 있다. 또한, 셀 구조를 갖는 준 분포형 모형의 결과를 산출함에 따라 배수분구에서의 비점오염원 유출현상의 공간적인 시각화가 보다 용이하다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 제안된 모형의 적용으로서 0.9342 km<sup>2</sup>의 배수분구 면적을 갖는 J시 N배수분구를 대상으로 몇 가지 수치적인 실험결과를 도출하였다. 환경부에서 적용하고 있는 비점오염원 저감목적의 5mm 저류지가 배수분구 말단부에 설치되었을 때의 효과를 살펴보았으며, 소규모 비점오염원 저감시설을 배수분구 전역에 분산적으로 설치하였을 때의 효과를 모의하여 이러한 소규모 시설의 설치우선지역을 도출하였다.

그러나 제안된 모형은 상대적으로 규모가 작고 도시적 토지이용비율이 상대적으로 높은 도시배수분구를 모형의 주 대상으로 하였기 때문에, 수문현상의 주요한 구성성분 중 하나인 증발산 및 지표하 유출 등이 고려되지 않았다는 한계점이 있다. LID 개념의 도시지역의 수문순환구조를 자연 상태의 수문순환구조로 복원하려는 여러 가지 시도가 일어나고 있는 시점에서 제안된 모형의 확장방향을 설정해 볼 수도 있을 것이다. 즉, LID 개념의 도시배수시스템의 설계를 위해서는 강우-유출 모형화뿐만 아니라 지하수 유출 및 증발산에 의한 손실 등이 모형을 통하여 정량화될 필요가 있기 때문이다. 또한 모든 모형이 그러하듯이 관측 자료에 대한 보정 및 검증이 추후 반드시 수행될 필요가 있을 것이다. 제안된 모형의 경우 주요한 매개변수로서 강우유출수 모의를 위한 도달시간과 비점오염원의 축적 및 쓸림을 위한 주요 매개변수들이 있으며, 이는 추후 각종 모니터링 자료 등을 통하여 토지이용상태별로 적절한 매개변수 범위 등이 도출되어야 할 것이다.

### 사 사

본 연구는 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2009-0065511).

### 참고문헌

장수형, 이지호, 유철상, 한수희, 김상단(2008). 우수유출저감 시설의 최적위치 결정. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(2), pp. 180-184.

전지홍, 최동혁, 김태동(2009). 지속가능한 도시개발을 위한 LID평가모델(LIDMOD)개발과 수질오염총량제에 대한 적용성 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(2), pp. 230-238.

최치현, 김호성, 김상단(2010) 유황곡선 보전을 위한 저류형 강우유출수 제어설비 설계. *학술발표회 논문집*, 한국수자원학회, P-77.

Behera, P. K., Adams, B. J., and Li, J. Y. (2006). Runoff quality analysis of urban catchments with analytical probabilistic models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **132**, pp. 4-14.

Bosley, E. K. (2008). Hydrologic evaluation of low impact development using a continuous, spatially-distributed model. MA thesis, Virginia Polytechnic Institute and State Univ., Va.

Carter, T. and Jackson, C. R. (2007). Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales. *Landsc. Urban Plann.*, **80**, pp. 84-94.

- Corbitt, R. A. (1999). *Standard Handbook of Environmental Engineering*, McGraw-Hill. 2ed.
- Elliott, A. H., Trowsdale, S. A., and Wadhwa, S. (2009). Effect of aggregation of on-site storm-water control devices in an urban catchment model. *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, **14**, pp. 975-983.
- Elliott, S., Ibbitt, R., Woods, R., Spigel, B., and Shankar, U. (2001). Stormwater modelling for biological flows and distributed flow controls. Proc., 2nd South Pacific Stormwater Conf., New Zealand Water and Wastes Association, Auckland, New Zealand, pp. 237-247.
- Jang, S. H., Cho, M., Yoon, J., Yoon, Y., Kim, S., Kim, G., Kim, L., and Aksoy, H. (2007). Using SWMM as a tool for hydrologic impact assessment. *Desalination*, **212**, pp. 344-356.
- Kaini, P., Artita, K., and Nicklow, J. W. (2007). Evaluating optimal detention pond locations at a watershed scale. *World Environmental and Water Resources Congress 2007*, K. C. Kabbes (ed.), ASCE, New York, pp. 1-8.
- Kertesz, R., Heaney, J., and Sansalone, J. (2007). Disaggregated modeling for urban hydrologic controls. *World Environmental and Water Resources Congress 2007*, K. C. Kabbes (ed.), ASCE, New York, pp. 1-11.
- Maryland Department of the Environment (2000). Maryland stormwater design manual, Vols. 1 and 2, Center for Watershed Protection and the Maryland Dept. of the Environment, Baltimore, Md.
- O'Callaghan, J. F. and Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage from digital elevation data. *Comput. Vis. Graph. Image Process*, **28**, pp. 328-344.
- Perez-Pedini, C., Limbrunner, J., and Vogel, R. (2005). Optimal location of infiltration-based best management practices for storm water management. *J. Water Resour. Plan. Manage.*, **131**, pp. 441-448.
- Prince George's County (1999). Low-impact development hydrologic analysis. Prince George's County, MD Department of Environmental Resources.
- Segarra-Garcia, R. and Loganathan, V. G. (1992). Storm-water detention storage design under random pollutant loading. *J. Water Resour. Plan. Manage.*, **1185**, pp. 475-491.
- Soil Conservation Service (1986). Urban hydrology for small watersheds. Technical Release 55, U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C.
- Wanielista, M., Kersten, R., and Eaglin, R. (1997). *Hydrology Water Quantity and Quality Control*. John Wiley & Sons. 2nd ed.
- Warwick, J. J. and Litchfield, J. (1993). Impact of spatial and temporal data limitations on the modeling of runoff quantity and quality. Water management in the '90s: A time for innovation, K. Hon (ed.), ASCE, New York, pp. 862-865.