비점오염원 저감 LID 시설의 최적설치위치 결정 및 효율 정량화를 위한 분포형 수문모형의 개발

Development of a Simple Distributed Hydrologic Model for Determining Optimal Installation location and Quantifying Efficiency of LID Devices for Reducing Non-point Sources

이정훈* · 조선주** · 김진관*** · 서성철**** · 김상단*****

Lee, Jeonghoon · Cho, Seon Ju · Kim, Jin Kwan · Seo, Seongcheol · Kim, Sangdan

Abstract

In this paper a simple distributed hydrologic model is proposed to determine optimal installation location of LID devices and to quantify their non-point sources reduction efficiency in urban drainage catchment. The proposed model is applied to simulate surface runoff and non-point sources loading on urban drainage based on square cells. In the model, rainfall events occurring at each cell are transformed into surface runoff events by NRCS-CN technique, and non-point sources pollutants which have been built-up at dry period are discharged at wet period by washed-off process. Since the model can represent the drainage flow path explicitly when the overland flow is occurred and moved into the next lower cell, it is possible to look at the effects of the LID facilities positioning as well as the non-point sources reducing efficiency of such facilities.

Key words : Stormwater, Distributed hydrologic model, Non-point sources management, LID, Determine the optimal install location

요 지

본 연구에서는 도시 배수분구에서 배출되는 비점오염원을 저감하기 위하여 설치되는 저영향기법 시설들의 최적설치위치 결정 및 이러한 시설들의 효율을 정량화하기 위해 적용될 수 있는 분포형 수문모형이 제안된다. 제안된 모형은 정방향 셀을 기반으로 도시 배수분구의 강우유출수와 비점오염원의 유출을 모형화한다. 각각의 셀에서의 강우사상은 NRCS-CN 기법에 의하여 지표면 유출사상으로 전환되며, 비점오염원은 건기 시에 지표면에 축적되어 강우 시에 쓸림 과정을 통하여 배출된다. 모형은 지표면 유출수가 발생되어 하류 셀로 이동할 때 배수분구의 흐름경로를 명확하게 구현할 수 있기 때문에, LID 시설의 비점오염원 저감 효과뿐만 아니라 시설의 설치위치에 따른 효과를 정량적으로 살펴보는 것을 가능하게 한다.

핵심용어 : 강우유출수, 분포형 수문모형, 비점오염원관리, 저영향개발, 최적설치위치결정

1. 서 론

비점오염원은 토지이용 상태에 따라 오염원이 광범위하게 분포하여 있어 오염물질의 발생은 어느 특정지점이 아니라 유역전체에서 일어나며, 오염물질의 유출은 강우 시에 발생하므로 발생원의 확인이 곤란하며 이동경로 또한 명확치 않기 때문에 관리가 어려운 오염원이다. 도시적 토지이용의 확대는 기존의 점오염원 관리 중심의 정책만으로는 더 이상의 수질 개선이 어려워짐에 따라 선진국에서는 비점오염원의 적극적 규제 및 처리를 시행하고 있으며, 우리나라도 최근에 와서

공공수역의 수질관리를 위해서는 비점오염원 제어가 중요하다는 사실을 점차 인식하고 있는 추세이다(Kim and Han, 2010).

이와 관련하여 최근 국내외적으로 저영향개발(low impact development, 이하 LID) 기법을 비롯하여 도시화에 따른 영향을 최소화하면서 도시를 개발하고자 하는 개념이 도입되고 있다(장수형 등, 2008; 최치현 등, 2011). 비점오염원 관리의 측면에서 적용 가능한 시설들을 살펴보면 생태저류지, 침투 트렌치, 옥상녹화, 식생수로, 빗물탱크 등 소규모 분산형 비점오염원 저감시설이라 정리할 수 있으며(Elliott et al.,

*정회원 · 부경대학교 환경공학과 석사과정(E-mail : bravo281@hanmail.net)

**부경대학교 환경공학과 석사과정

***정회원 · 고려대학교 건축사회환경시스템공학과 연구교수

****한국환경공단 수생태시설처 과장

*****정회원 · 부경대학교 환경공학과 부교수(교신저자)

2009), 이들 각각의 시설에 대한 비점오염원 저감 효율뿐만 아니라 설계 및 시공방법, 비점오염원 배출을 포함한 도시 배수분구의 수문현상 모의 시에 이들 시설의 영향을 평가할 수 있는 기법 등을 정립하는 것이 사회적으로 요구되고 있다.

하지만 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 모델링은 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 위해서 모의 모델의 사용은 정책 결정을 위한 매우 중요한 정보를 생산하게 된다(Perez-Pedini et al., 2005).

현재 우리나라에서 실무적으로 가장 많이 적용되고 있는 비점오염원 해석 모형은 Storm Water Management Model (이하 SWMM)이라 할 수 있다. 또한 SWMM의 최근 version은 다양한 LID 시설들을 모의할 수 있는 기능이 추가되어 LID 시설 설치 시의 비점오염원 저감효과를 보다 정량적으로 살펴볼 수 있게 되었다. 그러나 SWMM은 기본적으로 lumped 모형임에 따라 우리나라 도시지역과 같은 복잡한 토지이용패턴을 정확하게 구현할 수 없을 뿐만 아니라 소규모 시설을 유역 전반에 분산적으로 설치하는 LID 시설들의 효과를 명확하게 나타낼 수 없다. 즉, SWMM은 일정 크기 이상으로 분할된 소유역에 일련의 LID 시설들을 모두 묶어 하나의 시설로 모형화하기 때문에 흐름경로 상에 설치된 특정 LID 시설의 개별적인 성능을 정량화할 수 없을 뿐 아니라, 흐름경로의 명확한 구현이 모형 구조적으로 불가능함에 따라 개별적인 LID 시설들의 최적설치위치를 식별하는데 적용하기에는 많은 문제점을 가지고 있다(김상단 등, 2010).

따라서 본 연구에서는 도시 배수분구에서 배출되는 비점오염원을 저감하기 위하여 유역 전반에 분산적으로 설치되는 LID 시설들의 최적설치위치 결정 및 이러한 시설들의 개별적인 효율을 정량화하기 위해 적용될 수 있는 간단한 분포형 수문모형이 제안된다. 제안된 모형의 목적은 SWMM과 같은 범용 소프트웨어를 적용하기에 앞서서 LID 시설들의 개략적인 비점오염원 저감효과를 파악하고, 그러한 효과를 최대한으로 발휘할 수 있는 명확한 설치위치를 제공하려는 것이다. 따라서 제안된 모형으로부터 도출된 결과들을 바탕으로 개별 LID 시설들의 최적설치위치 및 설치 개소 수, 개별시설별 설치용량 등이 결정되고 나면, 이를 바탕으로 SWMM과 같은 범용 소프트웨어를 적용하여 보다 구체적인 비점오염원 저감 성능을 살펴볼 수 있을 것이다.

이러한 목적에 따라서 제안된 모형은 정방형 셀을 기반으로 도시 배수분구의 강우유출수와 비점오염원의 유출을 모형화하기 위하여 최소한의 프로세스로 구성된다. 각각의 셀에서의 강우사상은 NRCS-CN 기법에 의하여 지표면 유출사상으로 전환되며, 비점오염원은 건기 시에 지표면에 축적되어 강우 시에 쓸림 과정을 통하여 배출된다. 모형은 지표면 유출수가 발생되어 하류 셀로 이동할 때 배수분구의 흐름경로를

명확하게 구현할 수 있기 때문에, LID 시설의 비점오염원 저감 효과뿐만 아니라 시설의 설치위치에 따른 효과를 정량적으로 살펴보는 것을 가능하게 한다.

2. 연구방법

2.1 표준강우사상

전통적으로 단일 설계호우사상기반의 접근법은 극한 강우에 대비한 홍수방어를 목적으로 개발되었기 때문에 일상적인 강우사상을 대상으로 하는 비점오염원 관리 목적에는 부적절한 것으로 알려져 있다(Adams and Papa, 2000; 최대규 등, 2011). 그러나 적용 배수분구를 10-30 m 정도의 해상도를 분할하여 분포형 수문모형을 적용할 경우에는 지표면 유출의 흐름속도를 고려할 때 계산시간 간격이 10초 이내인 경우에만 흐름 경로를 명확하게 구현한 모의가 가능하게 된다. 따라서 최고 사양의 개인 컴퓨터를 이용하여 모의한다 하더라도 장기간의 연속모의모형의 실행에는 현실적인 문제가 발생하게 된다. 이에 본 연구에서는 일상적인 강우사상 중에서 표준강우사상을 선정하여 이를 제안된 분포형 수문모형에 적용하여 지표면 유출량 및 비점오염원 부하량을 모의하고자 한다. 표준강우사상을 결정하기 위한 일련의 과정은 아래와 같다.

장기간 관측된 강우 기록은 연속된 강우의 펄스(pulse)들로 이루어져 있어 각각의 개별적인 강우사상으로 분리하기 위해서는 각 강우의 시작과 끝을 구별할 수 있는 기준이 필요하다. 본 연구에서는 연속적인 강우기록으로 개별적인 강우사상을 분리하는 기준으로 IETD(Inter-Event Time Definition)를 적용하였다. 즉, 인접한 두 개의 강우 펄스 사이의 무강우시간이 기준치인 IETD보다 짧은 경우 두 개의 강우사상은 하나의 강우사상으로 간주하게 되며, 무강우시간이 IETD보다 길 경우에는 각각의 서로 다른 두 개의 독립 강우사상으로 간주하는 것이다(Fig. 1 참조).

본 연구에서 IETD는 변동계수분석법에 의하여 결정된다. 변동계수분석법이란 여러 가지 IETD를 적용하여 도출한 무강우시간 시계열을 분석하여 무강우시간 시계열의 평균과 표준편차가 같아지는, 즉 변동계수가 1과 가장 가까운 값을 주는 IETD를 선정하는 방법이다. 이는 무강우시간 시계열이

Fig. 1. Definition of IETD (Adams et al., 2000).

일반적으로 지수분포를 따른다는 가정에 기초한다(Kim and Kavvas, 2006).

상기와 같이 결정된 IETD를 적용하여 구성한 개별적인 강우사상들로부터 선행 무강우시간 및 강우지속기간은 아래와 같은 지수분포를 따르는 것으로 간주된다.

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \text{ for } t \geq 0 \quad (1)$$

여기서, λ 는 무강우시간 혹은 강우지속시간이며 λ 는 지수분포의 매개변수이다.

개별적인 강우사상들의 강우량은 아래와 같은 3변수 혼합 지수분포를 따르는 것으로 간주된다. 이는 우리나라 강우자료의 경우 단순 지수분포보다는 3변수 혼합 지수분포가 더 적합하다는 Kim and Han (2010)의 연구를 따른 것이다.

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

여기서, V 는 강우량이며, α, β, γ 는 매개변수이다. 지수분포 및 3변수 혼합 지수분포의 매개변수는 모멘트법에 의하여 산정할 수 있다(Kim and Han, 2010).

강우사상으로부터 강우유출수 사상으로서의 전환은 아래와 같이 NRCS-CN 방법을 적용한다(Soil Conservation Service, 1972).

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

$$V_o = \frac{(V - V_i)^2}{V - V_i + S} \text{ for } V \geq V_i \quad (3)$$

여기서, V_o 는 직접유출고(mm)이며, V_i 는 초기 손실량(mm)으로 0.2S를 적용한다. 식 (2)에서 잠재토양수분보유량 S 는 아래와 같이 표현된다.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4)$$

여기서, CN 는 NRCS의 유출곡선지수로서 토양도 및 토지이용도로부터 산출된다. 본 연구의 경우 선행토양수분조건을 보통인 경우(즉, $CN-II$)로 설정하여 표준강우사상의 선정에 적용하였다.

유도된 확률밀도함수(derived probability density function) 이론을 적용하여 강우량에 대한 확률분포인 식 (2)와 강우-유출모형인 식 (3)으로부터 직접유출고에 대한 누가확률분포 식을 아래와 같이 얻을 수 있다(Fig. 2 참조). 보다 상세한 사항은 최대규 등 (2011)을 참조할 수 있다.

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

$$= 1 - \gamma e^{-k/\alpha} - (1-\gamma) e^{-k/\beta} \quad (5)$$

여기서, k 는 다음과 같이 산정된다.

$$k = \frac{V_o + 2V_i + \sqrt{V_o^2 + 4V_o \times S}}{2} \quad (6)$$

식 (5)는 강우사상이 발생하였다는 조건이 주어졌을 경우에

Fig. 2. Derived probability density function(Kim and Han, 2010).

그에 따른 직접유출고에 대한 누가확률밀도함수이며, 강우사상들 중에서는 직접유출을 만들어내지 못하는 사상들도 존재하게 된다(강우량이 0.2S 이하인 경우). 따라서 직접유출이 발생하였다는 조건이 주어질 경우에 그에 따른 직접유출고의 누가확률밀도함수는 아래와 같이 유도된다.

$$G(V_o) = \frac{P[v_o \leq V_o]}{P[v_o \neq 0]}$$

$$= \frac{P[V_i < v \leq k]}{P[v > V_i]} \quad (7)$$

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

식 (7)을 이용하면 직접유출사상이 발생하였을 경우에 대한 직접유출고의 평균을 구할 수 있고, 이러한 직접유출고의 평균으로부터 식 (3)을 이용하여 이러한 직접유출고를 발생시키는 강우량을 계산할 수 있게 되며, 이러한 강우량을 표준강우량으로 결정하였다. 표준강우량의 지속시간과 선행 무강우시간은 식 (2)를 이용하여 각각의 평균값을 적용하며, 강우강도는 강우량을 지속시간으로 나누어줌으로써 표준강우사상을 구성하게 된다.

2.2. 강우-유출모형

강우-유출 모형은 결정된 대표강우사상을 입력 자료로 하여 유역의 강우와 유출 및 비점오염물질 부하량을 모의하게 된다. 대상 유역은 30 m × 30 m 크기의 셀 단위로 구성되며, 이때 고려해야할 특성과 모델을 위해 특성화된 각 셀의 주요한 물리적인 특성은 다음과 같다.

- ① 강우는 공간적으로 균등하게 분포한다.
- ② 각 셀은 동일한 지표면 특성을 갖는다.
- ③ 각 셀에서의 지표면 흐름은 인근 8개 셀 중 가장 낮은 셀로 모두 유입되며, 다른 셀로는 유입되지 않는다.
- ④ 유역 내에서의 유출은 지표면 유출 또는 하천 유출로 구성된다.

모델 구동에 필요한 셀의 주요한 특성인지는 다음과 같다.

- ① 셀의 크기
- ② 고도(elevation)
- ③ 유출방향 (상/하/좌/우/상좌/상우/하좌/하우 중 한 방향, 팔방흐름모형)
- ④ 토양특성
- ⑤ 토지이용특성
- ⑥ CN값

O'Callaghan and Mark(1984)의 D-8 알고리즘과 DEM(Digital Elevation Model)을 이용하여 각 격자에 대한 흐름 방향 정보를 구축하여, 각 셀에서의 지표면 흐름은 인근 8개 셀 중 가장 낮은 셀로 유입되며, 다른 셀로는 유입되지 않게 된다. 따라서 유역 상류의 셀들 일수록 유역 하류의 셀들을 거쳐 강우유출수를 유역의 출구로 이송시키게 된다. 이 때, 셀의 이송특성은 지표면 유출과 하천 유출로 구분할 수 있으며 구분의 기준은 얼마나 많은 상류 셀들의 강우유출수가 해당 셀을 거쳐 하류로 이송되는지에 따라 결정된다. 따라서 stream threshold number를 다양하게 바꾸어 가며 유역의 하천도를 잘 묘사하는 흐름누적 셀 개수를 선정하게 된다.

이에 따라 셀에서의 강우유출수 이동시간은 크게 지표면 흐름과 하천흐름으로 나뉘게 된다. 이때 하천흐름은 경사에 따라 유속을 다르게 계산하지만(식 (8) 참조), 지표면 흐름은 유속을 일괄적으로 1 m/sec로 가정하여 계산하게 구성된다.

$$t = \frac{L}{V} \quad (8)$$

여기서, L 은 해당 셀에서의 다음 흐름 셀까지의 이동거리(m)이며, 유속 V 는 흐름경사 $S \leq 1/200$ 인 경우 $V = 2.1$ m/sec, $1/200 < S < 1/100$ 인 경우 $V = 3.0$ m/sec, $S \geq 1/100$ 인 경우 $V = 3.5$ m/sec가 적용된다.

강우유출수에 의한 비점오염원의 유출과정은 지표면 위로 오염물질이 축적되는 과정과 강우유출수 발생 시 오염물질이 쓸려나가는 과정으로 크게 구분된다. 강우유출수 사상이 발생하기 전에 지표면에 축적되는 비점오염물질의 양은 아래와 같이 모의된다(Behera et al., 2006).

$$P_b = M(1 - e^{-N_e(b-b^*)}) \quad (9)$$

$$b^* = \frac{1}{N_2} \ln \left[\frac{M}{M - P_b^0} \right] \quad (10)$$

여기서 P_b 는 직전 선행 강우사상의 종료 후 b 시간이 지났을 때의 단위면적당 비점오염물질의 축적량 (kg/km^2)이며 P_b^0 는 직전 선행 강우사상 종료 후 지표면에 남겨진 단위면적당 비점오염물질의 축적량 (kg/km^2), M 은 최대가능 축적량 (kg/km^2), N_e 는 축적률 계수(1/hour)이다. 상기와 같이 무강우기간 동안에 지표면에 축적된 비점오염물질은 강우유출수 사상이 발생하면 강우유출수와 함께 씻겨 배수분구 출구로 이송된다. 비점오염물질의 쓸림과정은 EMC(Event Mean Concentration) 개념을 도입하여 모의된다. 이는 강우유출수의 농도가 항상 일정하다고 가정하였음을 의미하나, 강우유출수 발

생 이전에 축적된 비점오염물질이 모두 유출되고 나면, EMC는 0이 되도록 구성하여 초기우수효과를 간접적으로 구현하도록 구성하였다. 또한 제안된 모형에서는 지표면의 토지이용특성에 따른 EMC의 변화를 고려하기 위하여 각 셀별 EMC는 우리나라 수계오염총량관리기술지침에서 추천하고 있는 토지 지목별 원단위에 비례하여 할당되도록 구성하였다. 이때 대상 오염물질은 수계오염총량관리기술지침을 참고하여 토지 지목별 연평균발생부하원단위 표에서 제공하는 BOD, TN, TP 중 BOD와 TP로 결정하였다.

제안된 모형에서는 이와 같은 방법으로 강우사상 발생 시에 배수분구를 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 의 공간적 해상도로 분할하여 6초 간격으로 강우유출수와 비점오염원 배출부하량을 모의함으로써 강우유출수의 흐름경로를 명시적으로 구현할 수 있게 된다. 즉, 강우 시에 어떤 특정 셀 A에서 모의된 강우유출수와 비점오염원 배출부하량은 6초 후에 식 (8)에 의해 규정된 이동시간에 따라 일부는 제자리에 남아있게 되며, 일부는 흐름 경로 상의 다음 셀 B로 이동하게 된다.

3. 연구결과

3.1 대상유역의 특성

대상유역은 경기도 구리시 장자 호수공원 인근 지역으로서 도시유역의 특징을 가지고 있으면서, 분류식 우수관거가 설치되어 비점오염원의 특징을 파악할 수 있는 지역으로 선정하였다. 대상유역의 배수면적은 22.3 ha이며 주로 아파트 지역으로 학교, 공원 및 상업지역으로 구성되어 있다.

대상유역의 수문분석을 수행하기 위해서는 시간 강수량자료가 필요하나 구리시에는 시간 강수량자료가 존재하지 않아 유역의 중심으로부터의 거리, 시수량 및 일강우 보유기록의 연속성 및 지형적인 특성, 강우의 진행방향 등을 고려하여 검토한 결과 기상청 서울 관측소가 강우 자료기록 보유년수가 51개년으로 충분하고 신뢰할 수 있는 자료를 보유하고 있어 이를 이용하여 수문분석을 실시하였다. 토양정보는 농업과 학기기술원에서 구축한 1:25,000 도엽의 정밀토양도를 이용하였으며 DEM으로부터 흐름방향, 흐름누적수, 경사 등의 정보를 추출하였다. 기본적인 유역 특성 자료를 Fig. 3에 도시하였다. 참고로 공간자료의 해상도는 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 이다.

3.2 모형 매개변수 추정

변동계수법으로 추정된 IETD는 10시간으로 결정되었으며 이를 바탕으로 2001년부터 2010년까지의 최근 10년의 강우의 통계분석 결과는 연평균 강우량과 직접유출량은 각각 1550.15 mm, 926.9422 mm로 나타났다. 모형에 적용하기 위한 대표강우사상은 강우량 48.3208 mm, 강우지속시간은 10.4862 hr, 무강우시간은 94.4347 hr로 산정되었다.

비점오염원의 축적과 쓸림을 모의하기 위한 매개변수는 축적과 관련하여 M 과 N_e , 쓸림과 관련하여 EMC가 있다. 값을 선정하기 위하여 제 2단계 수계오염총량관리기술지침(국립환경과학원, 2008)에 따라 최대가능 축적량을 토지이용패턴별(논, 밭, 초지, 임야, 대지, 기타), 대상오염물질(BOD, TP)

(a) Aerial Image of Drainage Catchment

(b) DEM

(c) Soil map

(d) Land use map

Fig. 3. Catchment Information.

Table 1. Parameters for non-point sources simulation

	n	N_e	EMC
BOD	55.4696 hours	0.001/ hr	17.0858 mg/L
TP	55.452 hours	0.001 /hr	0.42 mg/L

별 시간당 발생부하량에 시간의 무강우시간이 주어지는 것을 가정하여 각각의 셀별로 산정하였다. 따라서 수질항목별로 3 개의 매개변수가 존재하게 된다($M_{\text{값}}$ 산정을 위한 n , 축적과정 모의를 위한 N_e , 쓸림과정 모의를 위한 EMC). 본 연구에서는 일 년 동안에 제 2단계 수계오염총량관리기술지침(국

립환경과학원, 2008)에 따라 계산된 토지계 발생부하량이 모두 배출된다고 가정하여 그러한 비점오염원 배출부하량이 계산되는 매개변수를 비선형 최적화 기법을 이용하여 추정하였다. 그 결과는 Table 1과 같다.

3.3 강우유출수 및 비점오염원 부하량 모의결과

누적 흐름 셀 개수를 시행착오법으로 바꾸어 모의 한 결과 7개일 때 가장 실제 배수분구의 우수관망을 잘 나타냈으며 이때 하천흐름 셀을 할당한 결과 및 실제 우수관망과의 비교는 Fig. 4와 같다. 표준강우사상이 발생한다고 하였을 경우

(a) Actual drainage pipe

(b) Simulated drainage pipe

Fig. 4. Assignment of stream flow cells.

Fig. 5. Results of rainfall-runoff model.

Fig. 6. Example implementation of the flow path.

시간에 따라 유역출구에서 발생하는 강우유출수 및 비점오염 물 부하량을 모의한 결과는 Fig. 5와 같으며 이때 시간 해상도는 6초를 적용하여 모의하였다. 모의 결과 표준강우사상이

발생했을 시의 총 직접유출고는 22.7379 mm, BOD 배출부하량은 2.1416 kg, TP 배출부하량은 0.056149 kg으로 모의되었다.

Fig. 6에 특정 시간 구간 동안 흐름경로에 따라 셀들을 경유하여 이동하는 강우유출수의 거동을 도시하였다. Fig. 6으로부터 제안된 모형은 강우유출수가 배수분구 내에서 이동하는 흐름경로를 명시적으로 구현하고 있음을 살펴볼 수 있다.

3.4 비점오염원 저감을 위한 소규모 분산형 LID 시설의 효율 및 최적설치위치

비점오염원 저감을 위한 소규모 분산형 LID 시설은 빈번하게 발생하는 강우유출수를 배수분구 전체에서 분산적으로 저류 및 침투시킴으로서 강우유출수 발생량 저감과 비점오염원 배출량 저감을 도모하게 된다. 또한 생태적인 저류기능을 통하여 물리적, 화학적, 생물학적으로 오염물질을 제거하는 기능을 수행한다. 매우 다양한 종류의 LID 시설이 존재하며, 각 시설별로 강우유출수의 차집능력 및 비점오염원 저감효율이 매우 상이하므로, 본 연구에서는 30 m × 30 m 셀의 출구부에 1개의 LID 시설이 설치될 때, 5 mm의 강우유출수(부피 기준으로 하면 4.5 m³)를 차집하는 것으로 가정하여 강우

가 발생하였을 때 각 셀별로 5 mm를 차집하였을 경우에 배수분구 말단부에서 관측되는 비점오염 물질의 총량이 얼마나 감소하는지 살펴보았다. 배수분구의 모든 셀에 LID 시설이 설치되는 것은 현실적으로 불가능하므로 1개소부터 셀 전체에 LID 시설이 설치될 경우에 대한 비점오염원 저감효율을 분석하고자 하였으며, LID 시설 수별로 최적설치위치를 설정하고자 하였다.

이때 토지이용도와 토양도를 이용하여 LID 시설의 설치가 가능한 지역을 우선적으로 식별할 필요가 있다. 예를 들어 토지이용상태에 따른 설치 가능 LID 시설을 살펴보면, 도로의 경우에는 infiltration trenches, 아파트나 공공건물의 경우에는 green roofs, 나대지의 경우에는 filter strips 등이 가능할 것이다. 하지만 침투기반 LID 시설의 성능을 확보하기 위해서는 NRCS 토양분류기준에서 A와 B type에만 적용이 가능하다. 따라서 제안된 모형에서는 침투기반 LID 시설을 설치한다고 가정하여 C와 D type의 토양을 가진 지역에는 LID 시설을 설치하지 않는 것으로 가정하였다.

Table 2. Optimal installation location and quantifying efficiency

No.	BOD			TP		
	Column	Row	Reduction (kg)	Column	Row	Reduction (kg)
1	8	25	0.04475	8	25	0.00107
2	10	22	0.03239	10	22	0.00078
3	8	24	0.03217	8	24	0.00078
4	10	18	0.03189	10	18	0.00077
5	9	25	0.03104	9	25	0.00075
6	10	25	0.03072	10	25	0.00074
7	15	14	0.02315	15	14	0.00058
8	13	14	0.02225	13	14	0.00056
9	15	13	0.02207	15	13	0.00055
10	9	21	0.02095	9	21	0.00052
11	10	19	0.02095	10	19	0.00052
12	9	22	0.02037	9	22	0.00051
13	15	16	0.01958	12	16	0.00048
14	12	16	0.01958	15	16	0.00048
15	13	18	0.01926	13	18	0.00048
16	11	19	0.01620	17	19	0.00042
17	7	29	0.01620	13	19	0.00042
18	11	21	0.01620	14	19	0.00042
19	11	17	0.01620	11	25	0.00042
20	13	13	0.01620	11	24	0.00042
21	14	13	0.01620	12	25	0.00042
22	7	33	0.01620	16	25	0.00042
23	10	26	0.01620	11	29	0.00042
24	9	23	0.01620	13	23	0.00042
25	11	18	0.01620	8	26	0.00039
26	17	16	0.01620	7	29	0.00039
27	16	16	0.01620	11	20	0.00039
28	14	14	0.01620	9	29	0.00039
29	15	12	0.01620	12	18	0.00039
30	14	12	0.01620	10	14	0.00039

(a) Install 20 sites (BOD)

(b) Install 20 sites (TP)

(c) Install 40 sites (BOD)

(d) Install 40 sites (TP)

(e) Install 80 sites (BOD)

(f) Install 80 sites (TP)

Fig. 7. Optimal installation location.

배수분구 전체에서 오직 하나의 셀에만 LID시설을 설치하였을 경우 비점오염원 저감효율이 높은 순으로 최적설치위치를 설정하였다. 주어진 예산에 다른 LID 시설 도입 시 최적설치위치를 도식적으로 표출하기 위하여 LID 시설을 각각 20, 40, 80개소를 설치할 경우에 대한 최적설치위치를 Fig. 7에 도시하였으며 Table 2에는 그 중 상위 30개소에 대한 위치 및 저감량을 나타내었다. 이때 Fig. 7 내의 (a), (c), (e)는 각각 20, 40, 80개소 설치 시의 BOD 저감을 위한 최적 위치를 나타내며, 옆의 범례는 각 셀별 BOD 저감량을 나타내는 것으로 셀의 색이 진할수록 저감량이 높다는 것을 뜻한다. 나머지 (b), (d), (f)는 TP에 대한 각 개소별 최적 위치 및 저감량을 나타낸다. Fig. 7과 Table 2를 살펴보면

비점오염원 저감량은 토지이용도 및 흐름경로에 영향을 받는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 최근 10년간의 기상자료의 통계분석을 통하여 대표강우사상을 선정하고 이에 해당하는 강우사상 발생 시에 강우유출수 및 비점오염원의 거동을 모의하는 모형을 제안하였다. 이를 통하여 소규모 분산형 LID 시설의 효율 정량화하고 최적설치위치를 찾아보고자 하였다. 제안된 모형은 대상 배수분구를 일정한 해상도로 분할한 셀들로 나누어 우리나라 도시지역(특히, 구시가지)과 같은 복잡한 토지이용

패턴의 구현 및 비점오염원의 배출경로를 반영하도록 구성되었으며, 도시지역 강우유출수 및 비점오염원 부하량의 동시모의, 지표면에서의 비점오염원 축적 및 쓸림 과정 등을 모의할 수 있도록 하였다.

제안된 모형의 적용으로서 22.32 ha의 배수분구 면적을 갖는 경기도 구리시 장자 호수공원 인근 지역을 대상으로 LID 시설을 배수분구 전역에 분산적으로 설치하였을 때의 효과를 모의하여 이러한 시설의 최적설치위치를 도출하였다. 이러한 분석결과는 주어진 예산에 따라 최적의 효과를 기대할 수 있는 LID 시설의 위치를 결정하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

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. 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 있다. 하지만 선정된 배수분구에 대한 관측자료가 존재하지 않아 이에 대한 대안으로 총량 토지계 배출부하량에 맞추어 모델 매개변수를 검보정하였으며 토지이용상태를 고려하기 위하여 총량 토지계 발생부하량을 참고하였다. 이는 추후 각종 모니터링 자료 등을 통하여 토지이용상태별로 적절한 매개변수 범위 등이 도출되어야 할 것이다.

또한 LID 개념의 도시지역의 수문순환구조를 자연 상태의 수문순환구조로 복원하려는 여러 가지 시도가 일어나고 있는 시점에서 제안된 모형에서 설정된 최적설치위치를 바탕으로 SWMM을 연계하여 장기유출모의를 시도하는 등의 확장 방향을 설정해 볼 수도 있을 것이라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국환경산업기술원에서 주관하는 차세대에코이노베이션기술개발사업의 일원인 통합 비점 유출 모형 개발 및 실용화 연구의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 국립환경과학원 (2008) 제 2단계 수계오염총량관리기술지침.
 김상단, 임용관, 김진관, 강두기, 서성철, 이재관 (2010) 도시유역에서 공간적으로 분포된 소규모 강우 유출수 관리시설의 최적설치위치선정, **수질보전 한국물환경학회지**, 26권, pp. 986-993.
 장수형, 이지호, 유철상, 한수희, 김상단 (2008) 우수유출저감 시설의 최적위치 결정, **수질보전 한국물환경학회지**, 24권, pp. 180-184.
 최대규, 김진관, 이재관, 김상단 (2011) 지표면의 시공간적 변화를 고려한 비점오염원 저감저류지 최적용량산정, **수질보전 한국물환경학회지**, 27권, pp. 9-18.
 최치현, 최대규, 이재관, 김상단 (2011) 도시 물 순환 건전성을 위한 유수지와 침투기반 저류지의 복합설계기법, **대한환경공학회 논문집**, 33권, pp.1-8.
 Adams, B.J., Papa, F. (2000) Urban Stormwater Management Planning with Analytical Probabilistic Models, John Wiley & Sons, New York.
 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.
 Elliott, A.H., Trowsdale, S.A. and Wadhwa, S. (2009) Effect of aggregation of on-site stormwater control devices in an urban catchment model, *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, 14, pp. 975-983.
 Kim, S. and Kavvas, M.L. (2006) Stochastic point rainfall modeling for correlated rain cell intensity and duration?, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 11, pp. 29-36.
 Kim, S. and Han, S. (2010) Urban Stormwater Capture Curve Using Three-Parameter Mixed Exponential Probability Density Function and NRCS Runoff Curve Number Method, *Water Environment Research*, 82, pp. 43-50.
 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.
 Soil Conservation Service (1972) National Engineering Hand-book, section 4, Hydrology. U.S Dept. of Agriculture, Washington, D.C.

◎ 논문접수일 : 2012년 05월 04일

◎ 심사의뢰일 : 2012년 05월 10일

◎ 심사완료일 : 2012년 06월 18일