SWMM-LID 요소기술 적용에 따른 유출해석(II): 매개변수 불확실성 분석

Analysis of Runoff According to Application of SWMM-LID Element Technology (II): Parameter Uncertainty Analysis

김응석*

Kim, Eung Seok*

Abstract

This study quantitatively analyzed the degree of uncertainty associated with runoff based on the sensitivity analysis of runoff parameters using Low Impact Development (LID) element technology of study (I). Uncertainty was analyzed for parameter uncertainty, uncertainty of runoff, and uncertainty about the degree of parameter and runoff. Parameter uncertainty indices showed lower uncertainty indices as a whole and uncertainty indices of peak runoff were higher than that of total runoff in runoff uncertainty. The reason for this is that the LID element technology itself is intended to store low-frequency small-scale rainfall, so that the uncertainty index of peak rainfall seems to be highly uncertain. As a result of the analysis of uncertainty degree associated with runoff, it was found that the uncertainty of storage depth of bio retention cell and rain garden was low, while the heaviness parameters of rain barrel had the highest uncertainty index. In future experiments and research, it is necessary to modify the parameter range suitable for Korea, which will be helpful for urban development, reduction of nonpoint source pollution, and designing of low frequency rainfall storage facilities.

Key words : Parameter Uncertainty, LID Element Technology, Rainfall Storage Facility

요 지

본 연구는 연구(I)의 저영향개발(Low Impact Development, LID) 요소기술별 매개변수의 유출 민감도분석을 바탕으로 유출에 미치는 불확실성 정도를 정량화하여 분석하였다. 불확실성을 분석을 위해 매개변수 불확실성, 유출의 불확실성, 매개변수와 유출에 미치는 정도의 불확실성으로 구분하여 분석하였다. 매개변수 불확실성지수의 경우 전체적으로 불확실성 지수 자체가 낮게 나타났으며, 유출의 불확실성의 경우 침투유출량의 불확실성 지수가 총유출량의 불확실성 지수보다 높게 나타났다. 이러한 이유는 LID 요소기술 자체는 저빈도 소규모 강우를 저류하는 것이 목적이기 때문에 침투강우량의 불확실성 지수가 높게 나타난 것으로 판단된다. 유출에 미치는 불확실성 정도를 분석한 결과 생태저류지 및 빗물정원의 storage depth가 불확실성이 낮았으며 빗물통의 height 매개변수가 가장 불확실성 지수가 높았다. 향후 실험 및 연구를 통해 국내에 맞는 매개변수 범위를 수정할 필요가 있다고 판단되며, 도시개발 및 비점오염 저감 연구와 저빈도 강우 저류시설 설계 시 도움을 주리라 판단된다.

핵심용어 : 매개변수 불확실성, LID 요소기술, 강우 저류시설

1. 서 론

국내 산업화 및 도시화로 인해 불투수 면적율은 급격히 증가하였으며 이로 인한 유출량 증가로 도시지역의 피해도

증가하고 있으며, 따라서 투수성 재료에 따른 LID요소기술 적용 및 유출저감 기법과 하수관거 시공비용 검토 그리고 소규모 배수구역의 물순환 개선 분석 등의 다양한 연구가 진행되고 있다(Perez-Pedini et al., 2005; Montalto et al.,

*교신저자, 정회원, 선문대학교 토목방재공학과 교수(Tel: +82-41-530-2325, Fax: +82-41-530-2926, E-mail: hydrokes@sunmoon.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil and Disaster Prevention Engineering, Sunmoon University

2007; Shamsi, 2011).

또한, 지하수자원 고갈 및 침투량 감소, 증발산량의 감소 등의 이유로 물 순환에 영향을 주고 있어 여러 국가에서 LID 연구를 수행하고 있다. LID는 기존의 집중형 빗물관리 시설과 다르게 대상지역의 자연을 이용하여 강우유출수가 발생하는 발생원에서 관리하는 기술을 의미한다. LID 시설물이란 분산형 빗물관리시설로서 유역 내 소규모의 LID 시설물을 시공하여 강우유출수를 저류, 채류, 방지, 처리하는 기능을 한다. LID 개념의 궁극적인 목표는 계획단계에서 개발이전의 물순환 기능을 유지하는 것으로 보전, 영향최소화, 유출이동시간 유지, 추가유출량 감소, 오염방지에 초점을 맞추어 계획한다. 국내 역시 물 순환 체계의 개선을 위해 아산 탕정 신도시를 시범 적용지역으로 지정하여 LID 시설물들의 시공이 진행되고 있으며, 다양한 LID 시설물들의 개발 및 성능 검증에 대한 연구가 진행되고 있다.

현재 국내에서 LID의 연구는 강우 유출수 및 비점오염원 저감효과, 물 순환 체계 개선에 대한 연구가 주를 이루고 있다. Lee et al. (2014)은 수영강 유역을 대상으로 LID 시설물들의 비점오염원 저감효율을 분석하였고, Kang et al. (2014)은 LID의 성공적인 도입을 위한 도시계획과의 연계방안을 분석하기 위해 현재 국내 도시계획 및 개발 관련제도를 검토하고 LID와 연계성을 분석하였다. Jeon et al. (2014)은 미국 환경부에서 LID의 비용-효과분석을 위해 개발한 SUSTAIN모형을 이용하여 LID 시설물들의 시공비용, 강우 유출수 저감효율, 비점오염원 저감효율을 분석하였다. Shin et al. (2013)은 상습침수지역인 수영강 하류유역을 대상으로 초과강우에 대한 LID 시설물들의 강우유출수 저감효과를 분석하였다. Paek and Gil (2013)은 식생수로 길이가 비점오염물질 저감효율에 미치는 영향을 분석하기 위하여 용인시 포곡면에 10~30 m의 식생수로를 시공하여 2012~2013년까지의 모니터링을 통하여 연구를 수행하였다.

국내외 수리·수문 모형을 이용한 도시유역의 유출해석 시 입력자료의 불확실성에 관한 연구들을 살펴보면 다음과 같다. Chung, Sim, et al. (2015)은 서울의 가산1 빗물펌프장 유역을 대상으로 과거 피해가 큰 호우 사상으로 적용하여 SWMM 모형의 총 40개 입력 매개변수 중 도시 유역 유출을 계산하는 RUNOFF 블록에 총 18개 매개변수 중에서 기존 선행 연구사례를 바탕으로 유역폭, 불투수면적 비율(%), 투수 및 불투수유역의 조도계수(%), CN, 관 조도계수 등 6개의 매개변수에 대해 불확실성 정량화 지수를 산정하였다. 또한, Chung, Yeon, et al. (2015)은 도시유역의 비점오염 해석에 많이 사용되는 SWMM 모형에서 수질 매개변수의 민감도 및 불확실성 분석을 위해 축적(Build up)모형 매개변수와 유실(Washoff)모형 매개변수 등을 이용하여 서울 금천구 소규모 유역에 적용하였다. Ohn et al. (2018)은 교호작용 효과를 고려하여 분산분석을 바탕으로 하는 불확실성 분해 분석기법을 도입하여 기후변화에 따른 강우시나리오 기반

을 바탕으로 증주댐의 유입량 전망에 대해 분석하였다.

문헌조사 결과 SWMM-LID 요소기술별 매개변수를 이용한 불확실성 분석에 관한 연구는 미미한 실정이다. 따라서 선행된 연구(I)의 SWMM-LID 요소기술별 주요 매개변수의 민감도 분석 결과를 바탕으로 본 연구는 SWMM-LID 모형의 요소기술별 매개변수가 내포하고 있는 불확실성을 분석하였다. SWMM-LID 요소기술별 매개변수의 민감도와 불확실성 결과는 추후 모형 적용에 있어서 강우-유출 결과에 관한 보다 높은 신뢰도 값을 제공할 것으로 판단된다. 특히, LID 요소기술에 필요한 소재 또는 시공방법 개발에 따른 실·내외 실험 시에 본 연구의 결과는 실험에서 발생할 수 있는 다양한 오차를 줄여 줄 것으로 판단된다.

2. 연구방법

2.1 요소기술별 매개변수의 민감도 산정

SWMM-LID 모형은 ① 생태저류장치, ② 옥상녹화, ③ 빗물정원, ④ 투수성포장, ⑤ 침투트렌치, ⑥ 빗물통 등의 6가지 요소기술로 구성되며, 요소기술별 특징을 고려하여 매개변수가 구성되어 있다. SWMM-LID의 입력자료는 ① 표면층, ② 토양층, ③ 포장층, ④ 저류층, ⑤ 압거층, ⑥ 배수매트층 등 총 6개의 구성층으로 구성되며, 총 28개의 매개변수 구성되어 있다.

SWMM-LID 모형의 6개 요소기술별 매개변수의 민감도 산정은 연구(I)에서 각 매개변수 범위를 확률밀도 함수로 가정하여 요소기술별 매개변수의 민감도를 산정하였다. 연구(I)에서 산정된 LID 요소기술별 매개변수별 민감도 분석 결과를 살펴보면 생태저류지 요소기술에서 Storage depth, Vegetation, Conductivity 등 3개의 매개변수, 옥상녹화 요소기술에서 Storage depth, Porosity, Wilting point 등 3개의 매개변수, 빗물정원 요소기술에서 Storage depth, Vegetation 등 2개 매개변수, 빗물통 요소기술에서 Height 1개 매개변수를 산정되었다. 따라서 본 연구에서는 산정된 매개변수를 바탕으로 불확실성 분석을 수행하였다.

2.2 불확실성 분석 방법

수리·수문해석에 사용되는 많은 모형들은 다양한 매개변수를 포함하고 있다. 또한 이러한 매개변수 입력값은 정확히 알 수 없는 불확실성을 내포하고 있으므로 불확실성에 대한 정확한 개념 이해가 필요하다. 불확실성에 관한 이론은 경제학, 행정학, 공학 등 다양한 분야에서 적용되고 있으며 적용 분야에 따라 조금씩은 그 의미를 다르게 해석하고 있다. 공학 분야에서 불확실성(Uncertainty)은 어느 정량값에 대한 관측 또는 계산 값이 그 정량의 참값에서 벗어나 추정되는 값으로 이를 통계적 관점에서 보면 평균의 편차, 확률오차, 표준 편차 등으로 보편적으로 정의한다. 불확실성은 위험(Risk)과는 다르게 특정 사건(Event)이 발생할 확률

자체를 예측하기 어려운 상태를 의미한다.

불확실성이 수리·수문 해석에 미치는 영향을 살펴보면, Jeong et al. (2004)은 미래의 기상예보를 바탕으로 유역단위의 국내 장기 수자원 운영을 위해 보편적으로 널리 이용되는 수치모형인 범지구모형(Global Climate Model, GCM)의 적용하였다. 또한 장기적 모의 결과가 가져올 수 있는 불확실성을 확률적 방법으로 분석하여 처리 하였다. 그러나 GCM 모형은 국내의 경우 우기(6-9월)평균에 의한 극치값에 관한 결과는 대체적으로 유용한 값을 보여 주었으나 분산 정도가 큰 건기(10-5월)의 경우는 모형의 한계를 나타내었다. Lee et al. (2016)은 기후변화가 가져올 수 있는 미래 수자원의 시공간적 특성에 관해 불확실성 평가기법을 제시하였다. 연구결과에서 불확실성을 평가할 수 있는 기법을 제시하기 위해 기후모형(5개), 통계처리법(5개)과 수문모형(2개) 등을 이용하여 이수기와 홍수기로 구분하여 각 모형들을 적용하고 모형의 불확실성을 저감할 수 있는 방안을 나타내었다.

본 연구에서는 Qaisi (1985)가 제시한 관측값에 대한 실제 모형의 수행한 결과의 분산정도를 적용하여 SWMM-LID 모형의 매개변수별 다양한 불확실성을 나타내었다. Qaisi (1985)는 총 불확실성(Total Uncertainty, TU)을 관측값들의 평균값에 대한 모형 결과의 오차로 Eq. (1)을 제시하였다.

$$\text{Total Uncertainty} = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \frac{(Y_{ij}^m - Y_i)^2}{n_1 \cdot n_2}$$

$$\text{Total Uncertainty (TU)} = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \frac{(Y_{ij}^m - Y_i)^2}{n_1 \times n_2} \quad (1)$$

여기서 n_1 은 관측자료 수, n_2 는 모의횟수, Y_{ij}^m 은 i 에서 j 번째 모의 값, Y_i 는 i 에서 관측값들의 평균이다. 매개변수의 불확실성(Parameter Uncertainty, PU)은 모의 입력 값의 평균값에 대한 모형의 거동에 대한 분산을 나타냈으며 Eq. (2)와 같다.

$$\text{Parameter Uncertainty (PU)} = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \frac{(Y_{ij}^m - Y_i^{mb})^2}{n_1 \times n_2} \quad (2)$$

여기서 Y_{ij}^{mb} 는 위치 i 의 모의값의 평균을 의미한다. 또한 Eq. (3)은 모형구조가 가지는 불확실성(Structural Uncertainty, SU)으로 총 불확실성과 매개변수의 불확실성의 차이 값이다. 즉, 총 불확실성은 매개변수에 의한 불확실성과 모형 구조에 의한 불확실성으로 구성된다고 정의한 것이다.

$$\text{Structural Uncertainty (SU)} = \sum \frac{(Y_i^{mb} - Y_i)^2}{n_1} \quad (3)$$

본 연구는 SWMM-LID 모형의 매개변수별 불확실성을

분석하기 위해 Eq. (2)인 매개변수 불확실성을 적용하였다. 매개변수에 의한 불확실성 분석을 위해 매개변수 변화에 따른 유역에서의 침투유출 및 총유출의 변화를 분석하였다. 매개변수의 적용을 위해 모의 입력값은 Monte Carlo Sampling 기법 이용하여 100개 시나리오를 추출하였다. 또한 매개변수의 불확실성(PU) 제시할 경우 다른 매개변수와와의 상대적 비교가 어려워 이를 해결하기 위해 불확실성의 침투유출 및 총유출의 변화에 대한 영향을 정량적으로 나타내었다. 매개변수의 변화에 따른 침투유출 및 총유출의 변동폭을 분산값으로 산정하여 유출량(침투유출 또는 총유출)의 분산(Runoff Variation, RV)에 따른 매개변수의 불확실성을 불확실성 정량화 지수(Uncertainty Quantification Index, UQI)로 Eq. (4)에 나타내었다.

$$\text{Uncertainty Quantification Index(UQI)} = \left| 1 - \frac{PU}{RV} \right| \quad (4)$$

즉, 매개변수 불확실성(PU)과 유출량(침투유출 또는 총유출)의 분산(RV)결과 값이 같으면 “0”이고, 매개변수의 불확실성(PU) 분산결과 값이 유출량(침투유출 또는 총유출)의 분산(RV)결과 값 보다 크거나 작은 경우 “0” 보다 큰 값을 가지므로 매개변수 불확실성 변화가 유출량(침투유출 또는 총유출)에 많은 영향을 준다는 것을 뜻한다. 본 연구에서는 LID 요소기술별 매개변수의 범위 및 단위를 표준하기 위해 Eq. (5) Re-Scaling 방법을 사용하였다.

$$\text{Standard Index(S)} = \frac{(x - x_{\min})(s_{\max} - s_{\min})}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

(여기서, $s_{\max} = 1, s_{\min} = 0$)

여기서, x 는 모의값(매개변수의 시나리오), $x_{\max}, x_{\min}$ 는 매개변수 시나리오의 최대, 최소값, $s_{\max}, s_{\min}$ 는 표준화 지수 범위로 “0~1”의 범위를 갖는다.

3. 적용 및 결과

3.1 대상유역 및 강우선정

본 연구의 대상유역은 연구(I)과 동일한 유역을 적용하였으며 자세한 유역에 관한 정보는 연구(I)에 기술하였다. 대상 유역에 관해 간략하게 살펴보면, 대상유역 총면적은 150,821 m^2 이며, 토지이용은 건물(15%), 식생(41.3%), 주차장(20.1%), 보도(8.5%), 도로(14.5%) 등으로 구성되어있다. 유역에서 발생하는 강우는 모두 지방하천인 대곡천으로 유출되며 출구까지의 길이는 약 1.28 km이고 최대 도달시간은 약 39.8분이다. 모든 우수관망은 관거 14개, 절점 14개, 유출구 1개 등으로 10개 소유역으로 구분되어 10년 빈도로 설계

되어 있다.

본 연구의 대상유역에 적용한 강우사상은 연구(I)과 동일한 사상을 적용하였다. 대부분의 도시유역의 경우 2시간 이내에 강우 발생에 따른 유출이 발생하므로 선문대학교 유역의 경우 강우발생 이후 최대도달시간은 약 40분으로 산정되었으며, 우수관거 설계 시 10년 빈도로 설계되어 있다. 따라서 천안시 확률강우량 10년 빈도 지속시간 60분 확률강우량을 사용하였으며 5분 단위 Huff 3분위로 강우를 분포시켜 사용하였다.

3.2 불확실성 분석 결과

불확실성 분석 결과 Table 1에서 LID 요소기술과 매개변수별 매개변수 불확실성(PU), 침투유출량 분산(PRV), 총유출량 분산(TRV)을 산정하고, 불확실성 정량화 지수 Eq. (4)를 이용하여 매개변수별 침투유출량 불확실성 정량화지수(Peak Runoff, PR-UQI)와 총유출량 불확실성 정량화지수(Total Runoff, TR-UQI)를 산정하여 나타내었다.

LID 요소기술별 매개변수별 불확실성 산정결과 생태저류지 Storage depth의 경우 매개변수 불확실성 지수는 0.082로 나타났으며, 침투유출량 불확실성지수는 0.138, 총유출량 불확실성지수는 0.082로 나타났다. 이를 Eq. (4)를 이용하여 불확실성 정량화지수를 산출한 결과 침투유출량 불확실성 정량화 지수는 0.406, 총유출량 불확실성 정량화지수는 0.000 산출되었다. 이는 생태저류지의 Storage depth는 침투유출량에 불확실성이 크다는 것을 알 수 있다. 생태저류지 Vegetation의 매개변수 불확실성 지수의 경우 0.081, 침투유출량 불확실성 지수는 0.075, 총유출량 불확실성지수는 0.086으로 나타났다. 침투유출량 및 총유출량 불확실성 정량화지수를 산정한 결과 0.080, 0.058로 나타났다. 생태저류지의 Conductivity의 불확실성지수를 산출한 결과 매개변수의 경우 0.075, 침투유출량 및 총유출량지수 불확실성지수는 0.069, 0.077로 나타났다. 이를 이용하여 침투유출량 및 총유출량 불확실성 정량화 지수를 산정한 결과 0.087, 0.026으로

산출되었다.

생태저류지와 동일한 방법으로 옥상녹화, 빗물정원, 투수성포장, 침투트렌치, 빗물통의 불확실성을 산정한 결과 투수성포장, 침투트렌치의 경우 불확실성이 매개변수에 따른 침투유출량 및 총유출량에 불확실성이 존재하지 않는 것으로 나타났다. 옥상녹화 및 빗물정원, 빗물통의 매개변수별 불확실성 정량화 지수를 산정한 결과는 Table 1에 나타내었다.

전체적으로 매개변수 불확실성지수를 산출한 결과 생태저류지의 Conductivity가 0.075로 가장 낮은 불확실성을 보였으며 빗물정원의 Vegetation이 0.097로 가장 높은 불확실성을 보였다. 또한, 매개변수 불확실성 지수의 경우 Beta 분포에서 Random number를 통해 무작위로 산출되었기 때문에 각 요소기술별 매개변수의 불확실성 정도에는 큰 차이를 보이지 않은 것으로 판단된다. 침투유출량 불확실성 지수를 산출한 결과 생태저류지의 Conductivity가 0.069로 가장 낮은 불확실성을 보였으며 빗물통의 Height가 0.206로 가장 높은 불확실성을 보였다. 총유출량 불확실성 지수를 산출한 결과 옥상녹화의 Wilting point가 0.058로 가장 낮은 불확실성을 보였다. LID 요소기술별 매개변수가 침투유출량 및 총유출량에 미치는 정도를 불확실성 정량화 지수를 통해 산출한 결과 생태저류지 및 빗물정원의 Storage depth가 불확실성 정량화 지수 0.000으로 불확실성이 존재하지 않았으며, 빗물통의 Height 매개변수가 0.539로 가장 높은 불확실성 지수를 보였다. 따라서 불확실성이 높은 매개변수의 경우 매개변수값의 범위를 결정함에 있어 보다 세심한 주의가 필요하다고 판단된다.

전체적으로 총유출량 불확실성 정량화 지수가 침투유출량 정량화지수에 비해 낮은 불확실성을 보였다. 이러한 이유는 LID 요소기술은 저빈도 소규모 강우를 저류하는 것이 목적이기 때문에 강우사상의 침투 강우 발생 시 불확실성이 크게 나타난 것으로 판단된다.

Table 1. Uncertainty Index Result of Parameters and Reservoir Characteristics

Element Technology	Parameters	Parameter Uncertainty (PU)	Peak Runoff Variation (PRV)	Total Runoff Variation (TRV)	Peak Runoff (PR-UQI)	Total Runoff (TR-UQI)
Bio Retention Cell	Storage depth	0.082	0.138	0.082	0.406	0.000
	Vegetation	0.081	0.075	0.086	0.080	0.058
	Conductivity	0.075	0.069	0.077	0.087	0.026
Green Roof	Storage depth	0.077	0.091	0.091	0.154	0.154
	Porosity	0.077	0.084	0.106	0.083	0.274
	Wilting point	0.079	0.097	0.058	0.186	0.362
Rain Garden	Storage depth	0.094	0.130	0.094	0.277	0.000
	Vegetation	0.097	0.158	0.095	0.386	0.021
Rain Barrel	Height	0.082	0.206	0.178	0.602	0.539

4. 결 론

도시화 및 산업화에 따른 물의 이용과 순환에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 여러 국가에서 저영향개발 LID 연구를 수행하고 있으나 국내의 경우 LID 요소기술 및 사용되는 매개변수에 대한 정보가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 연구(I)에서 선정된 LID 요소기술별 민감도 분석결과를 바탕으로 유출에 미치는 불확실성 정도를 파악하기 위해 불확실성을 정량적으로 분석하였다.

전체적으로 매개변수 불확실성지수를 산출한 결과를 살펴보면 생태저류지의 Conductivity가 0.075로 가장 낮은 불확실성을 보였으며 빗물정원의 Vegetation이 0.097로 가장 높은 불확실성을 보였다. 이러한 이유는 매개변수의 경우 정규분포형태를 가지는 Beta분포에서 무작위로 매개변수 값을 산출하였기 때문에 불확실성 지수 자체가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 침투유출량 및 총유출량의 불확실성 지수를 산정한 결과 전체적으로 침투유출량의 불확실성 지수가 총유출량의 불확실성 지수보다 높게 나타났다. 이러한 이유는 LID 요소기술 자체는 저빈도 소규모 강우를 저류하는 것이 목적이기 때문에 침투강우량의 불확실성 지수가 높게 나타난 것으로 판단된다.

불확실성 정량화 지수 값이 “0”에서 멀어질수록 SWMM-LID 매개변수에 따라 침투유출량과 총유출량 값이 크게 변화하므로 예측이 어려워지며 불확실성이 높아지는 것을 뜻하며, “0”에 가까운 값을 가질수록 SWMM-LID 매개변수의 변화에 따라 침투유출량과 총유출량 값을 예측하는 것이 용이하여 불확실성이 낮다고 할 수 있다. 그러므로 SWMM-LID 매개변수 중 침투유출량 및 총유출량의 불확실성이 가장 높은 것은 빗물통 요소기술의 height 매개변수로 0.602와 0.539로 각각 산정되었다. 즉, 이는 앞서 연구(I)에 수행한 민감도 분석 결과와 비슷한 양상을 나타냈었다.

반면에 생태저류지 및 빗물정원의 Storage depth는 불확실성 정량화 지수 값이 “0.0”으로 불확실성이 존재하지 않은 것으로 이는 Storage depth가 유출량과의 선형적인 관계를 보여 유출에 미치는 영향이 민감하기 때문이라 판단된다. 따라서 불확실성 요소를 감소시키기 위해서 빗물통의 Height 매개변수의 범위를 조정할 필요가 있다고 판단되며, 향후 실험 및 연구를 통해 국내에 맞는 매개변수 범위를 수정할 필요가 있다고 판단된다. 연구 결과에서 불확실성이 높게 산정된 매개변수의 경우 불확실성을 줄이기 위해서는 매개변수 입력 값 범위에 대한 보다 세심한 주의가 필요하다고 판단된다. 본 연구 결과를 통해 LID 요소기술의 유출에 영향을 미치는 주요 매개변수를 산정하였으며, 불확실성의 정도가 크게 나타나는 매개변수의 경우는 모형구축 또는 요소기술의 실험을 수행할 때 보다 주의를 기울여야 할 것으로 판단되었다. 또한, 본 연구는 도시개발, 비점오염원 저감, 저빈도 강우 저류지 설계 등의 연구에 많은 도움을

줄 수 있으리라 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2019년도 선문대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 이루어졌습니다.

References

- Chung, G.H., Sim, K.B., and Kim, E.S. (2015). Uncertainty quantification index of SWMM model parameters. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 2, pp. 105-114.
- Chung, G.H., Yeon, J.S., Sim, K.B., and Kim, E.S. (2015). The sensitivity and uncertainty analysis of SWMM water quality parameters. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 5, pp. 247-253.
- Jeon, J.H., Park, S.S., Park, C.G., and Kim, T.D. (2014). Evaluating implementation of EPA SUSTAIN model for cost-effective LID design. *Journal of the Korean Society of Urban Environmental*, Vol. 14, No. 2, pp. 135-143.
- Jeong, C.S., Heo, J.H., and Bae, D.H. (2004). Uncertainty analysis of GCM information in Korea using probabilistic diagnostics. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 2, pp. 173-184.
- Kang, J.E., Hyun, K.H., and Park, J.B. (2014). Assessment of low impact development (LID) integrated in local comprehensive plans for improving urban water cycle. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 5, pp. 1625-1638.
- Lee, J.H., Kang, D.K., Park, M.J., and Kim, S.D. (2014). Sturdy for management of non-point source in Sooyeong River watershed using SWMM. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 2, pp. 327-336.
- Lee, M.H., So, J.M., and Bae, D.H. (2016). Development of climate change uncertainty assessment method for projecting the water resources. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 8, pp. 657-671.
- Montalto, F., Behr, C., Alfredo, K., Wolf, M., Arye, M., and Walsh, M. (2007). Rapid assessment of the cost-effectiveness of low impact development for CSO control. *Landscape and Urban Planning*, Vol. 82, No. 3, pp. 117-131.
- Ohn, I.S., Kim, Y.D., and Kim, Y.O. (2018). Uncertainty decomposition in water resources projection considering interaction effects. *Journal of Korea*

- Water Resources Association*, Vol. 51, No. S-1, pp. 1067-1078.
- Paek, S.B., and Gil, K.I. (2013). Effects of grassed swale lengths on reduction efficiencies of non-point source pollutants. *Journal of Wetlands Research*, Vol. 15, No. 3, pp. 387-396.
- Perez-Pedini, C., Limbrunner, J., and Vogel, R. (2005). Optimal location of infiltration-based best management practices for storm water management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 131, No. 6, pp. 441-448.
- Qaisi, K.M. (1985). *Uncertainty analysis of stream dissolved oxygen models*. Ph.D. dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, Mi, USA.
- Shamsi, S. (2011). CSO reduction using green infrastructure. *Proceedings of the 13th Annual 3 River Wet Weather Sewer Conference on Rivers Wet Weather Demonstration Program*, Monroeville, PA, USA.
- Shin, D.S., Park, J.B., Kang, D.K., and Jo, D.J. (2013). An analysis of runoff mitigation effect using SWMM-LID model for frequently inundated basin. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 4, pp. 303-309. 반영함

Received	October 20, 2020
Revised	October 21, 2020
Accepted	October 26, 2020