도시지역 저영향개발을 고려한 수질 신뢰도 지수 개발

Developing a Water Quality Reliability Index Considering Low Impact Development in Urban Areas

김동준* · 최경민** · 송양호*** · 이정호****

Kim, Dong Jun*, Choi, Kyung Min**, Song, Yang Ho***, and Lee, Jung Ho****

Abstract

With the progress in urbanization, the existing pervious areas change into impervious areas. At the same time, this causes various environmental problems such as worsening the water quality and increasing non-point source pollutants due to excessive rainfall. Studies have proposed to supplement the environmental change problem for the development area through Low Impact Development (LID) techniques. This study evaluated the function of reducing non-point source pollution load in the urban basin through the application of various LID facilities. A reliability evaluation technique was conducted to quantitatively assess the problem of water pollution. Two elements with different levels of physical capacity were constructed using the Distance Measure Method to evaluate reliability. Based on Storm Water Management Model 5.1, various scenarios based on probability rainfall were considered in the Sungnae drainage basin. The results revealed the ideal pipe network in Scenario 3. This study included the need to manage the reduction of non-point source pollution in the urban basin through a preliminary review of various scenarios. By quantifying the results of water quality management of individual facilities, it can be used as basic data for setting effective reduction targets and making decisions considering the characteristics of the basin.

Key words : Low Impact Development, Reliability, Distance Measure Method, Storm Water Management Model, Water Quality

요 지

도시화 현상의 진행으로 기존의 투수면적은 불투수면적으로 변화한다. 동시에 초과강우에 따른 수질 악화 및 비점오염원 증가 등 다양한 환경적 문제를 야기한다. Low Impact Development (LID) 기법을 통해 개발지역에 대한 환경적인 변화 문제를 보완하는 연구들이 제안되고 있다. 본 연구는 다양한 LID 시설적용을 통한 도시유역의 비점오염부하의 저감기능을 평가하였다. 수질오염의 문제를 정량적으로 평가하기 위하여 신뢰도 평가기법을 제안하였다. 다른 차원의 물리량을 갖는 두 가지 요소는 Distance Measure Method를 통해 신뢰도 평가기법을 구성하였다. Storm Water Management Model 5.1을 바탕으로 성내배수분구 유역에 확률강우 기반의 다양한 Scenario를 고려하였다. 결과 Scenario 3에서 가장 이상적인 관망으로 판단되었다. 본 연구는 도시유역에서 비점오염원의 저감을 다양한 Scenario에 대한 사전 검토를 통해 관리되어야 할 필요성을 포함한다. 개별시설의 수질관리에 대한 결과를 정량화함으로써 유역의 특성을 고려한 효과적인 저감 목표치 설정과 의사결정을 위한 기초자료로 활용이 가능하다.

핵심용어 : 저영향개발, 신뢰도, 거리척도방법, Storm Water Management Model, 수질

*정회원, 국립한밭대학교 건설환경공학과 석사과정(E-mail: junhydro@gmail.com)

Member, Master's Course, Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Hanbat National University

**정회원, 국립한밭대학교 건설환경공학과 박사과정(E-mail: withckm@gmail.com)

Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Eng., Hanbat National University

***정회원, 환경부 국가물관리위원회 지원단 전문위원(E-mail: syho@daum.net)

Member, Research Fellow, Presidential Water Commission Support Department, Ministry of Environment

****교신저자, 정회원, 국립한밭대학교 건설환경공학과 교수(Tel: +82-42-821-1106, Fax: +82-42-821-1589, E-mail: leejh@hanbat.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Dept. of Civil and Environmental Eng., Hanbat National University

1. 서 론

기후변화와 동시에 도시화 현상은 도시 내배수 시스템에서 홍수 발생 시 수량적, 수질적 문제를 야기한다. IPCC (2014)에 따르면 극한 강수와 같은 기후변화가 명백하게 발생하고 있으며 동시에 증가하고 있음을 보고하였다. 한국 기후변화 평가보고서(KMA, 2020)는 우리나라의 여름철 호우일 발생 빈도와 강수 강도와 같은 극한 강수가 20세기 후반 이후 증가 경향을 보이며, 극한강수현상의 빈도와 강도는 지속적으로 증가할 것으로 전망하였다. UN DESA (2018)는 2018년 인구의 55%가 도시에 거주하며, 2050년까지 인구의 68%로 증가할 것이라 예상하였다. 이러한 도시화는 지속적인 인구증가와 과밀집에 의해 착소한 지역에서의 재산 가치 상승으로 귀결된다. 동시에 도시재해로 인한 피해 정도를 증가시키므로 도시재해에 대한 관심이 높아지고 있다. 도시화로 인한 불투수면적비의 증가는 물순환 체계를 변화시키며(Yoon, 2019), 직접 유출을 증가시켜 도시 내 홍수피해를 증가시킨다(Jung et al., 2013). 한국의 경우 2013년 기준 불투수면적이 전 국토의 7.9%에 해당하며, 임야 및 수계를 제외할 경우 22.4%에 해당하는 지역이 불투수면적으로 조사되었다(ME, 2013). 이때 발생하는 홍수는 산업화로 인한 각종 오염물질을 발생 및 유출시킨다(Hirabayashi et al., 2013). 오염물질을 함유한 유출수에 의해 인근 수계에서의 환경적 영향을 분석하기 위해서는 소유역 별 오염물질 부하량 검토가 필요하다. 도로나 주차장 같은 포장으로 인한 불투수 지역은 다른 토지이용보다 불투수성 면적 비율이 높아 강우 발생 시 비점오염원의 표면유출이 크다. 이러한 불투수성 면적 비율이 높은 시설은 강우에 의한 유출 유량과 수질 농도의 변화가 크게 나타나는 특성을 갖는다. 따라서 도심지의 수량 및 수질을 고려한 물순환 분석은 자연재해 예방 목적의 합리적인 의사결정의 정보를 제공하기 위한 연구가 필요하다. 도심지의 불투수면적 증가로 인해 변화된 물순환 체계와 홍수 저감 및 수질을 함께 개선하기 위해 강우-유출수 처리시설물인 Low Impact Development (LID)가 필요하다.

Low Impact Development (LID) 시설은 우수의 침투, 저류, 물순환 체계를 고려하는 홍수 저감을 목적으로 하는 토지이용계획 기법이다(U.S. EPA, 2000). 이미 진행된 도시화로 변화한 수문특성에 의해 발생하는 문제를 극복하기 위하여 수문학적 기능을 도시화 이전의 수문특성으로 회귀하기

위한 목적의 시설로 LID를 정의하고 있다(U.S. EPA, 2007). 도심 내 LID시설 설치에 도시수재해 문제에 대응하기 위한 도시 물관리의 방법 중 하나이며, 시설의 효율적인 적용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

LID 기술의 초기의 목적은 빗물 침투, 저류 및 활용으로 분산식 빗물 관리 시설로서의 LID 필요성을 제안하였다(Hyun et al., 2006). 이후 불투수면적 감소 및 저탄소 녹색도시의 방향성을 목적으로 하는 선진국에서의 LID 사용에 대한 필요성을 제시하였다(Hyun, 2010). 이후로는 다양한 목적으로써 LID 시설을 적용한 연구가 활발히 진행되었다. Shin et al. (2013)은 LID시설 적용 전 후 도시 물순환 개선 및 비점오염 저감 효과를 분석하였으며, 유출량과 수질 개선 효과를 확인하였다. Park et al. (2019)은 한정적인 예산에서 다양한 LID 시설을 최적화를 통해 조합하여 TP배출 부하량과 강우 유출수 저감을 확인하였다. 이외에도 LID 시설 설계 활용 목적으로써 다양한 LID 시설별 우수유출 저감 성능 평가와 같은 연구가 진행되었다(Kim and Joo, 2017). 또한, 우수관망의 치수 기능 평가연구로는 Lee and Park (2012)의 월류발생량과 월류발생지점 개수를 기반으로 우수관망 신뢰도 평가기법을 통하여 다양한 초과강우에서의 치수 신뢰도를 산정하였다.

도시지역은 불투수성 노면 포장의 비율이 높아 침투홍수량 증가와 함께 비점오염물질이 증가한다. 따라서 기존의 수량적인 측면들의 연구뿐만 아니라 수질적인 측면도 고려되어야 한다. 본 연구의 목표는 LID 기법을 포함한 우수유출 저감시설을 도입 시, 설계자가 개별시설의 수질관리에 대한 결과를 정량가능한 신뢰도 기반의 평가기법을 제안하고자 한다. 다만, 비점오염 관련 선행 연구들은 유역별 계측자료를 기반으로 오염부하량 산정의 적합성에 대한 검·보정을 실시한다. 검·보정은 연구논문의 타당성 및 신뢰성을 마련하는 과정이다. 다만 본 연구에서의 대상 지역은 시·군 단위에서 계측이 이루어지지 않았으며, 시·군 단위로 오염원 그룹별 오염부하량을 정확하게 산정하는 것은 미흡한 상태이다. 이를 개선하기 위해서 본 연구에서는 면적비를 고려하여 소유역 별 오염원 현황을 파악하고 국립환경과학원 수질오염총량관리지침(NIER, 2014)을 적용하여 오염원 발생 및 배출부하량 특성을 반영하였다. 본 연구의 목적은 적용 가능한 시설물 설계 Scenario들에 대한 오염원 발생 가능성을 고려한 최적의 목적함수를 구축하는데 의의가 있다. 이에 따라, 다음 Fig. 1의 절차와 같이 진행하였다.

Fig. 1. Flowchart of Water Quality Analysis of LID System

먼저 연구 적용대상 지역을 채택하였으며, 해당 지역의 확률 강우량을 선정하였다. 그 후 LID시설에 대한 Scenario를 결정하였다. Storm Water Management Model 5.1 Ver.을 이용하여 해당 지역의 강우빈도에 따른 Biochemical Oxygen Demand (BOD), Total Suspended Solids (TSS)와 Total Nitrogen (TN)을 산출하였다. 이후 본 연구의 목표인 수질 신뢰도 값을 산출하였다.

2. 연구방법

본 연구의 목표는 LID 기법을 포함한 우수유출 저감시설을 도입 시, 설계자가 개별시설의 수질 관리에 대한 결과를 정량적으로 평가하는 신뢰도 기반의 수치화 과정이다. 본 연구에서는 치수 기능을 기반으로 산정된 기존의 신뢰도의 방식을 본 연구에 적용하여 수질 신뢰도를 정의하였다. 또한, 정의된 수질 신뢰도 기법을 통하여 결과를 나열하였다. 연구 방법에는 기후변화 Scenario를 대변하는 초과강우사상을 고려하였다. Holzbauer-Schweitzer (2016)의 LID 매개변수를 적용하여 LID를 통한 도심지 수질 개선에 참고자료를 도출하는데 그 목적이 있다. 결과도출을 위해서는 도심지 우수관망을 이용한 강우-유출해석이 필요하며 EPA Storm Water Management Model (SWMM) 5.1 Ver.을 활용하였다.

2.1 Low Impact Development (LID) Scenarios

SWMM 모형에 적용되는 일반적인 소유역의 특성은 Fig. 2(a)와 같다. LID 시설을 SWMM 모형에 적용할 경우 Fig. 2(b)와 같다. LID 시설이 적용될 경우 불투수지역에서 발생된 우수유출수가 LID 지역 및 투수지역으로 전달되어 강우-유출수를 저류 및 침투시킨다. 이 과정에서 LID 시설은 단일 및 다수의 시설이 적용 가능하다.

본 연구에서는 LID 비설치 지역(Original Sub-catchment Condition)과 LID 시설인 투수성 포장(Permeable Pavements),

옥상녹화(Green Roof)를 조합하여 총 4가지의 Scenario를 구성하여 연구를 진행하였다. 먼저, LID 시설을 포함하지 않는 지역인 Scenario 1을 설정하였으며, 동일 면적에 투수성 포장, 옥상녹화를 적용한 Scenario 2, 3을 설정하였다. 또한, 면적 비를 동일하게 분할하여 투수성 포장, 옥상녹화를 조합한 Scenario 4를 설정하였다. 자세한 Scenario들의 분류는 다음의 Table 1과 같다.

Table 1. Scenarios and Components

Sorting	Component	Analysis Type
Scenario 1	Original Sub-catchment	No LID
Scenario 2	Permeable Pavements	LID Installation
Scenario 3	Green Roof	
Scenario 4	Permeable Pavements + Green Roof	

2.2 LID 시설 및 수질 별 매개변수

LID 시설 적용하기 위하여 침투 및 저류와 같은 강우-유출수의 성능에 영향을 주는 매개변수를 선정해야 한다. 본 연구에서는 다양한 LID 시설들 중에서 투수성 포장, 옥상녹화 시설에 대해 고려하였다. 투수성 포장의 주요 매개변수는 표면층, 포장층, 저류층, 암거층에 대한 총 16개의 입력 매개변수 값이 필요하다. 옥상녹화의 경우 표면층, 토양층, 배수매트층 등에 대한 총 14개의 입력 매개변수 값이 필요하다. 각층 별 매개변수의 값은 EPA에서 제시한 값과 다양한 참고 문헌 조사를 통해 검토하였으며 Table 2와 같이 Holzbauer-Schweitzer (2016)가 제안한 값을 반영하였다.

BOD 측정은 하수관거에서 유기물에 의한 오염 정도를 파악하기 위한 일반적인 방법이다. 높은 유기물 농도를 지닌 BOD가 높은 하수는 관로 내에서 혐기성 분해를 일으켜 악취를 발생시키며, 과부하 되어 처리기능을 저하한다. 특히

Fig. 2. Comparison of LID Facility before and after Installation

Table 2. Summary of LID Facilities Parameters

Layers	Parameters	Unit	Permeable Pavement	Green Roof
Surface layer	Storage depth	mm	25.0	25.0
	Vegetation	-	0.0	0.0
	Surface roughness	-	0.03	0.0
	Surface slope	percent	1.0	0.0
	Swale side slope	-	0.0	0.0
Soil layer	Thickness	mm	0.0	150
	Porosity	-	0.5	0.58
	Field capacity	-	0.2	0.34
	Wilting Point	-	0.1	0.04
	Conductivity	mm/hr	0.5	64.0
	Conductivity slope	-	10.0	5.0
	Suction Head	mm	3.5	75.0
Pavement layer	Thickness	mm	150	-
	Void ratio	-	0.15	
	Impervious Surface Fraction	-	0.0	
	Permeability	mm	500	
	Clogging Factor	-	0.0	
Storage layer	Height	mm	300	25.0
	Void ratio	-	0.66	0.66
	Contuctivity	mm/hr	1.0	0.0
	Clogging Factor	-	0.0	0.0
Under drain layer	Drain Coefficient	mm/hr	0.34	50
	Drain Exponent	-	0.5	0.5
	Drain offset Height	mm	100	0

도심지역의 경우 강우 발생 시 관거 내 TSS와 같은 체적토사가 침류되어 일시적인 BOD 상승을 유발한다. 이처럼 TSS 농도는 다양한 오염물질 입자들 중 BOD와 직접적인 연관이 있다. National Institute of Environment Research (NIER)의 수질오염총량관리기술지침(2014, 2015)에서 하수관거의 비점오염 경로 및 하수유통수의 오염부하량 산정 등에 대한 연구를 수행함에 있어 유통수의 수질항목을 BOD, TSS, TN 등을 특정 값 이하로 관리될 수 있도록 하는 공고기준을 제안한다. 본 연구에서는 수질 측정 항목으로써 BOD, TSS, TN을 사용하였다. 또한, 본 연구에서는 앞서 말한 도심지 비점오염원에 대한 삭감대상 부하비를 반영하여 연구대상 지역 내 LID 시설의 조합별 삭감부하량 증가율이 최대가 되는 소유역들을 선정하고 이에 대한 적용 및 분석을 수행하

였다. SWMM 모형의 검·보정을 수행하기 위해서는 대상유역별 강우사상에 따른 유출량 및 오염물질 배출량 등에 대한 계측자료가 필요하다. 신뢰도 높은 결과를 얻기 위해 수질 모형 매개변수로써 Yeon et al. (2014), Yeon (2015)이 수행한 미계측 지역에서의 강우자료를 이용하여 지표유출고를 산정할 수 있는 Soil Moisture Index (SMI) 방법의 결과를 반영하였다. 해당 연구에서는 토지이용 상태를 “교통 및 주거지역”으로 분류하였으며, NIER (2014, 2015)에서 제시한 비점오염원별 평균원단위를 사용하여 발생부하량을 산정하였다. 시행착오적 매개변수 추정을 통해 오염물질 농도 모델의 값이 연구결과에 근접하도록 Event Mean Concentration (EMC) 값을 산정하였다. 본 연구에서 적용한 BOD, TSS, TN의 발생부하량 매개변수를 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Summary Estimation Result of SWMM Water Quality Parameter

Parameter	Unit	BOD	TSS	TN
Residential area	Max. Buildup (kg/km ²)	3.14	27.08	2.76
	Rate Constant (1/day)	0.32	0.29	0.34

2.3 Utopian Approach Method

우수관망 시스템은 설계 과정에 반영된 빈도별 요구되는 치수 능력을 발휘해야 한다. Lee and Park (2012)은 치수안전성을 고려한 우수관망의 평가를 위한 신뢰도 분석기법을 제안하였다. 앞서 말한 이 연구는 월류발생량과 월류발생지점 수를 바탕으로 관망 구성 변화에 따른 파괴 현상을 고려하여 침수위험에 대한 평가를 수치화하였다. 본 연구에서는 우수관망 시스템에 LID 시설을 추가하여 Scenario 별 수질 개선 능력을 판단하려고 한다. 개선 능력을 하나의 값으로 수치화하는 과정에서 결과 값들의 단위 차원 및 범위의 척도를 동일시키고, 다른 Scenario와 상대적인 비교를 하기 위해 Utopian Approach의 거리척도방법을 이용하였다. 즉 Utopian point인 이상점과 수질 개선 능력을 포함하는 여러 Scenario에서 도출된 신뢰도와 이상점과의 거리 차이를 이용하여 상대적인 우위 비교하였다. 이를 그림과 수식으로 표현하면 Fig. 3 및 Eq. (1)과 같다.

Fig. 3. Utopian Approach Method Using Euclidean Distance

$$\text{Euclidean distance: } c = \sqrt{(a^2 + b^2)} \quad (1)$$

2.4 우수관망 수질 신뢰도 산정기법 및 절차

본 연구의 목표는 LID 기법을 포함한 우수유출 저감시설을 도입 시, 설계자가 개별시설의 수질 관리에 대한 결과를 정량가능 하게 하는 신뢰도 기반의 평가기법을 제안하는 과정이다. 본 연구에서는 기존의 Lee and Park (2012)의 신뢰도 연구에서의 치수 기능을 기반으로 산정된 신뢰도의 원리를 이용하여 수질 인자와 조합한 수질 신뢰도 연구를 진행하였다. EPA-SWMM 5.1을 이용하여 결정된 관망에서의 강우 지속시간별, 빈도별 유출구에서의 총 BOD량(O_B) (kg), 총 TSS량(O_T) (kg) 및 총 TN량(O_N) (kg)을 도출하였으며, 동일 조건 하 유역 내에서 발생한 총 BOD량(L_B) (kg), 총 TSS량(L_T) (kg), 총 TN량(L_N) (kg)을 도출하였다. 도출된 유출구에서의 총 BOD량과 유역 내에서 발생한 총 BOD량으

로 Eq. (2)와 같은 R_B 를, 유출구에서의 총 TSS량과 유역 내에서 발생한 총 TSS량으로 Eq. (3)과 같은 R_T 를, 유출구에서의 총 TN량과 유역 내에서 발생한 총 TN량으로 Eq. (4)와 같은 R_N 을 계산하였다. 최종적으로 도출된 R_B , R_T 와 R_N 을 Utopian Approach를 이용하여 Eq. (5)와 같이 수질 신뢰도 Reliability Index of Water Quality using DMM (RWQD)를 도출하였다.

$$R_B = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{O_B}{L_B}\right)^2}}{n} \quad (2)$$

$$R_T = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{O_T}{L_T}\right)^2}}{n} \quad (3)$$

$$R_N = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{O_N}{L_N}\right)^2}}{n} \quad (4)$$

$$\text{RWQD} = 1 - \frac{\sqrt{(1-R_B)^2 + (1-R_T)^2 + (1-R_N)^2}}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

3. 연구결과

3.1 적용대상 유역

연구대상 유역은 성내배수분구(Fig. 4(a))로 행정구역상 서울시 강동구 성내동, 송파구 오륜동, 풍납동 일부분으로 약 95.34 ha의 유역이다. 총 27개의 소유역으로 이루어져 있으며, 초과강우사상에 대하여 고정적으로 홍수가 발생하는 6개의 소유역에 LID시설을 배치하였다(Fig. 4(b)). 총 26개의 맨홀과 26개의 관거로 이루어져 있으며 유역 면적의 대부분이 건축물 및 주차시설로 구성되어있다. 자세한 유역의 정보를 Table 4에 나열하였다. 분석을 위해 적용된 강우 사상은 서울의 확률강우량을 바탕으로 지속시간 90분에서 각각 30년, 50년, 70년, 80년, 100년 빈도의 강우량을 Huff 3분위법(Huff's Quartile Method)을 적용하여 분석하였다 (Table 5). 도시유역의 특성상 단기간의 호우 사상이 아닌 90분을 고려한 이유는 성내배수분구 유역의 임계지속시간을 고려하였기 때문이다.

3.2 수질 신뢰도 연구결과

본 장에서는 거리척도방법을 이용한 우수관망 시스템의 수질 신뢰도 산정 결과를 나열하였다. 산정 결과에는 유역 내 오염물질인 BOD, TSS, TN의 변화에 대한 수질 신뢰도를 추정하였다. 먼저 R_B , R_T 와 R_N 을 산정하기 위한 각 오염물질 별 결과 및 도출과정을 Tables 6, 7, 8에 나열하였으며 최종 신뢰도 결과는 Table 9에 서술하였다. 다양한 Scenario 가정을 통해 우수관망 시스템에서의 개선된 신뢰도의 변화폭

(a) Pipe Network diagram of drainage basin in Seongnae

(b) Seongnae basin with installed LID facilities

Fig. 4. Seongnae Drainage Basin

Table 4. Watershed Properties of Study Area

Category	Specification
Address	Seongnae dong, Gangdong-gu, Seoul, Republic of Korea
Area (ha)	95.34
Number of nodes/links (EA)	26 / 26
Number of outlets (EA)	1

Table 5. Probable Rainfall of each Duration for Frequency in Seongnae

Duration	Frequency				
	30 years	50 years	70 years	80 years	100 years
60 min	116.7 mm	127.4 mm	134.4 mm	137.2 mm	141.8 mm

Table 6. BOD Pollutant Load Reliability Calculations

Frequency	O_B - Outfall $BOD(kg)$				L_B - $BOD(kg)$			
	Duration				Duration			
	Scen 1	Scen 2	Scen 3	Scen 4	Scen 1	Scen 2	Scen 3	Scen 4
30 years	196.897	190.354	190.311	190.332	167.655	162.487	162.621	162.554
50 years	198.287	191.744	191.699	191.729	167.655	162.561	162.690	162.625
70 years	199.194	192.738	192.651	192.665	167.655	162.613	162.757	162.685
80 years	199.460	193.232	192.996	192.991	167.655	162.634	162.765	162.699
100 years	200.095	193.632	193.565	193.643	167.655	162.670	162.803	162.736
Frequency	O_B / L_B				$(O_B / L_B)^2$			
	Duration				Duration			
	Scen 1	Scen 2	Scen 3	Scen 4	Scen 1	Scen 2	Scen 3	Scen 4
30 years	1.1744	1.1715	1.1703	1.1709	1.3793	1.3724	1.3695	1.3710
50 years	1.1827	1.1795	1.1783	1.1790	1.3988	1.3913	1.3884	1.3900
70 years	1.1881	1.1853	1.1837	1.1843	1.4116	1.4048	1.4011	1.4025
80 years	1.1897	1.1881	1.1857	1.1862	1.4154	1.4117	1.4060	1.4070
100 years	1.1935	1.1903	1.1890	1.1899	1.4244	1.4169	1.4136	1.4159
R_B	0.6228	0.6237	0.6242	0.6240				

Table 7. TSS Pollutant Load Reliability Calculations

Frequency	O_T - Outfall TSS(kg)				L_T - TSS(kg)			
	Duration				Duration			
	Scen 1	Scen 2	Scen 3	Scen 4	Scen 1	Scen 2	Scen 3	Scen 4
30 years	1,157.941	1,125.694	1,125.411	1,125.533	1,361.414	1,324.793	1,328.038	1,326.415
50 years	1,152.605	1,119.156	1,118.280	1,118.738	1,361.414	1,324.227	1,328.075	1,326.151
70 years	1,153.137	1,119.278	1,117.933	1,118.481	1,361.414	1,324.009	1,328.157	1,326.083
80 years	1,153.634	1,120.380	1,118.503	1,119.068	1,361.414	1,323.944	1,328.127	1,326.035
100 years	1,155.754	1,121.263	1,119.742	1,120.642	1,361.414	1,323.859	1,328.165	1,326.012
Frequency	O_T / L_T				$(O_T / L_T)^2$			
	Duration				Duration			
	Scen 1	Scen 2	Scen 3	Scen 4	Scen 1	Scen 2	Scen 3	Scen 4
30 years	0.8505	0.8497	0.8474	0.8486	0.7234	0.7220	0.7181	0.7200
50 years	0.8466	0.8451	0.8420	0.8436	0.7168	0.7143	0.7090	0.7117
70 years	0.8470	0.8454	0.8417	0.8434	0.7174	0.7147	0.7085	0.7114
80 years	0.8474	0.8462	0.8422	0.8439	0.7181	0.7161	0.7092	0.7122
100 years	0.8489	0.8470	0.8431	0.8451	0.7207	0.7174	0.7108	0.7142
R_T	0.6207	0.6213	0.6229	0.6221				

Table 8. TN Pollutant Load Reliability Calculations

Frequency	O_N - Outfall TN(kg)				L_N - TN(kg)			
	Duration				Duration			
	Scen 1	Scen 2	Scen 3	Scen 4	Scen 1	Scen 2	Scen 3	Scen 4
30 years	132.688	128.905	128.864	128.882	152.69	148.513	148.858	148.685
50 years	132.384	128.464	128.351	128.410	152.69	148.464	148.836	148.65
70 years	132.602	128.648	128.486	128.554	152.69	148.446	148.847	148.646
80 years	132.717	128.830	128.606	128.674	152.69	148.441	148.843	148.642
100 years	133.055	129.025	128.845	128.952	152.69	148.435	148.848	148.641
Frequency	O_N / L_N				$(O_N / L_N)^2$			
	Duration				Duration			
	Scen 1	Scen 2	Scen 3	Scen 4	Scen 1	Scen 2	Scen 3	Scen 4
30 years	0.8690	0.8680	0.8657	0.8668	0.7552	0.7534	0.7494	0.7514
50 years	0.8670	0.8653	0.8624	0.8638	0.7517	0.7487	0.7437	0.7462
70 years	0.8684	0.8666	0.8632	0.8648	0.7542	0.7511	0.7451	0.7479
80 years	0.8692	0.8679	0.8640	0.8657	0.7555	0.7532	0.7466	0.7494
100 years	0.8714	0.8692	0.8656	0.8675	0.7593	0.7556	0.7493	0.7526
R_N	0.6114	0.6121	0.6135	0.6128				

Table 9. Results of Water Quality Reliability

Results	Scen 1	Scen 2	Scen 3	Scen 4
R_B	0.6228	0.6237	0.6242	0.6240
R_T	0.6207	0.6213	0.6229	0.6221
R_N	0.6114	0.6121	0.6135	0.6128
$RWQD$	0.6183	0.6190	0.6202	0.6196

을 확인한 결과, 직접적인 수치의 변화가 적으므로 신뢰도의 개선이 이루어졌음을 논하기엔 어렵다. 그러나 Scenario 별 수질오염 발생에 대한 위험도가 감소함에 따라 신뢰도의 값이 점차 개선되는 형태를 확인할 수 있다. Table 9의 Scenario 2와 4의 경우 신뢰도 평가항목에 대한 평가지수가 유사하게 나타난 결과에도 불구하고 수질오염 부하량을 반영함으로써 보다 정량적인 우수관망 시스템의 수질오염에 대한 신뢰도 산정이 가능하다. 즉 오염물의 저감을 판단하고자 할 때, 저감된 양의 변화에 따라 Table 9와 같이 RWQD의 한 개의 신뢰도 값 정량화되어 산정된다.

4. 결 론

도시화 현상의 진행으로 기존의 투수면적은 불투수면적으로 변화한다. 동시에 초과강우에 따른 수질 악화 및 비점오염원 증가 등 다양한 환경적 문제를 야기한다. 이와 같은 변화된 물순환 체계와 홍수 저감 및 수질을 함께 개선하기 위해 강우-유출수 처리시설물인 Low Impact Development (LID)가 필요하다. 특히 오염물질을 함유한 유출수에 의해 인근 수계에서의 환경적인 영향을 파악하기 위해서는 소유역 별 오염물질 부하량 검토가 필요하다. 따라서 본 연구의 목표는 LID 기법을 포함한 우수유출 저감시설을 도입 시, 설계자가 개별 시설의 수질 관리에 대한 결과를 정량 가능하게 하는 신뢰도 기반의 평가기법을 제안하였다. 이를 위해 기존의 수량적 문제를 평가하기 위한 신뢰도 기법을 이용하여 수질적 평가에 적용하였다. Tables 6, 7, 8은 본 연구에서 진행한 성내배수분구에 대한 수질 신뢰도 결과 도출 표이다. 각각 성내배수분구를 통한 수질 결과물을 도출하였으며, Table 9에 종합한 RWQD값을 산출하였다. BOD, TSS, TN 결과를 고려하였을 때, Scenario 3의 최종 RWQD값이 가장 큰 0.6202를 갖는다. 이는 거리척도기법을 이용한 신뢰도에서 이상점인(1, 1)에 Scenario 3이 가장 가깝기 때문에, 상대적으로 타 Scenario와 비교하여 수질 개선 측면에서 Scenario 3이 가장 이상적인 관망이라 할 수 있다. 본 연구는 재현기간, 강우지속기간, 강우 분포형태의 강우인자의 차이에 따라 동일한 관망에서라도 편차가 발생할 수 있다. 하지만, 강우 인자를 고정한다면 LID 시설 비점오염원 저감 측면의 비교가 가능하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 스마트시티 혁신성장동력 프로젝트 지원으로 수행되었음(과제번호 19NSPS-B154314-02).

References

Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima,

- L., Yamazaki, D., Watanabe, S., et al. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, Vol. 3, No. 9, pp. 816-821.
- Holzbauer-Schweitzer, B. (2016). *Evaluating low impact development best management practices as an alternative to traditional urban stormwater management*. Master's thesis, University of Oklahoma.
- Hyun, K.H. (2010). Roads to go for low-carbon cities-LID (Low impact development, LID). *Geoenvironmental Engineering*, Vol. 11, No. 6, pp. 5-12 (in Korean).
- Hyun, K.H., Chang, S.Y., and Ahn, S.S. (2006). Nature-adapted rainwater management facility cases in Korean apartment complexes. *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 15, No. 2, pp. 111-119.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate change 2014: Synthesis report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the IPCC, Geneva, Switzerland.
- Jung, J.H., Choi, G.W., and Oh, H.J. (2013). An application of integrated water cycle system in U-City. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 14, No. 12, pp. 6597-6601.
- Kim, J.H., and Joo, J.G. (2017). A study on the performance comparison of the low impact development facilities for long-term stormwater reduction. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 5, pp. 337-344.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2020). *Korean climate change assessment report 2020*. pp. 22-23 (in Korean).
- Lee, J.H., and Park, M.J. (2012). A reliability evaluation method of storm sewer networks for excessive rainfall events. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 12, No. 4, pp. 195-201.
- Ministry of Environment (ME). (2013). *According to the first survey of all national territory, the average ratio of impermeable water is 7.9% nationwide*.
- National Institute of Environment Research (NIER). (2014). *Total amount of water pollution control technology guidelines*. NIER (in Korean).
- National Institute of Environment Research (NIER). (2015). *Evaluation of Pollutants reduction for control of the total amount of water pollution*. NIER (in Korean).
- Park, Y., Kim, R., Jang, J.K., Song, Y., and Yang, D.M. (2019). Basin management using multi-objective optimization: Focus on reductions of TP loading and runoff. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No.

- 7, pp. 433-441.
- 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.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2000). *Low impact development (LID): A literature review*. U.S. EPA Office of Water (4203) EPA-841-B-00-005, Washington, DC, USA. Retrieved from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P1001B6V.PDF>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2007). *Reducing stormwater costs through low impact development (LID) strategies and practices*. EPA 841-F-07-006.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN DESA). (2018). *2018 revision of world urbanization prospects*. Retrieved from <https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>
- Yeon, J.S. (2015). *Estimation of optimal design runoff depth at low impact development (LID) facilities*. Master's thesis, Sun Moon University.
- Yeon, J.S., Jang, Y.S., Lee, J.H., Shin, H.S., and Kim, E.S. (2014). Analysis of stormwater runoff characteristics for spatial distribution of LID element techniques using SWMM. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 15, No. 6, pp. 3983-3989.
- Yoon, E.H. (2019). *Development of smart monitoring system and optical quality management method of hydrologic data focused on LID testbed*. Ph.D. dissertation, Pusan National University.

Received	October 19, 2020
Revised	October 20, 2020
Accepted	October 29, 2020