



Capacity determination for a rainfall harvesting unit using an optimization method

Jin, Youngkyu^a · Kang, Taeuk^b · Lee, Sangho^{c*} · Jeong, Taekmun^d

^aPh.D Candidate, Department of Civil Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

^bResearch professor, Disaster Prevention Research Institute, Pukyong National University, Busan, Korea

^cProfessor, Department of Civil Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

^dMaster course, Department of Civil Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

Paper number: 20-071

Received: 23 July 2020; Revised: 10 August 2020; Accepted: 10 August 2020

Abstract

Generally, the design capacity of the rainwater harvesting unit is determined by trial and error method that is repeatedly calculating various analysis scenarios with capacity, reliability, and rainwater utilization ratio, etc. This method not only takes a lot of time to analyze but also involves a lot of calculations, so analysis errors may occur. In order to solve the problem, this study suggested a way to directly determine the minimum capacity to meet arbitrary target reliabilities using the global optimization method. The method was implemented by simulation model with particle swarm optimization (PSO) algorithms using Python language. The pyswarm that is provided as an open-source of python was used as optimization method, that can explore global optimum, and consider constraints. In this study, the developed program was applied to the design data for the rainwater harvesting constructed in Cheongna district 1 in Incheon to verify the efficiency, stability, and accuracy of the analysis. The method of determining the capacity of the rainwater harvesting presented in this study is considered to be of practical value because it can improve the current level of analytical technology.

Keywords: Rainwater harvesting, Storage, Particle swarm optimization, Reliability

최적화 기법을 이용한 빗물이용시설의 저류 용량 결정

진영규^a · 강태욱^b · 이상호^{c*} · 정택문^d

^a부경대학교 토목공학과 박사과정, ^b부경대학교 방재연구소 전임연구교수, ^c부경대학교 토목공학과 교수, ^d부경대학교 토목공학과 석사과정

요 지

일반적으로 빗물이용시설의 설계 저류 용량은 다양한 시나리오(저류 용량, 공급 보장률, 우수 이용률 등)에 대한 반복적인 계산을 통해 결정된다. 이 방법은 분석에 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 많은 계산이 수반되므로 분석 오류가 나타날 수도 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 최적화 기법을 이용하여 임의의 목표 보장률을 만족하는 최소의 저류 용량을 직접적으로 결정할 수 있는 방법을 제시하였다. 해당 방법은 Python 언어를 이용하여 모의 모형과 입자 군집 최적화를 연계하여 구현되었다. 최적화 기법은 Python의 오픈 소스로 제공되는 pyswarm을 이용하였는데, 해당 알고리즘은 전역 최적해 탐색이 가능하고, 제약조건을 고려할 수 있다. 최적화 기법을 이용한 빗물이용시설의 저류 용량 결정 방법은 인천 청라지구 1공구에 설치된 빗물이용시설의 설계자료에 적용하여 분석의 효율성, 안정성, 정확성을 검증하였다. 본 연구에서 제시한 빗물이용시설의 저류 용량 결정 방법은 현재의 분석 기술 수준을 개선할 수 있으므로 실용적 가치가 있는 것으로 판단된다.

핵심용어: 빗물이용시설, 저류 용량, 입자 군집 최적화, 보장률

*Corresponding Author. Tel: +82-51-629-6076
E-mail: peterlee@pknu.ac.kr (S. Lee)

1. 서론

대체 수자원으로서 빗물의 이용은 기존의 용수 공급을 보조할 수 있을 뿐만 아니라 빗물이용을 통한 관리비 및 수도세 저감, 교육적 효과, 쾌적한 주거공간의 창출 등을 기대할 수 있다(Choi *et al.*, 2011b). 이와 관련하여 우리나라에서는 물의 재이용 촉진과 물 자원의 효율적 활용 등을 목적으로 ‘물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률’ 제8조 제1항과 ‘물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률 시행령’ 제10조 및 ‘물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률 시행규칙’ 제4조에 따라 특정한 규모 이상의 공동주택, 학교, 골프장 등의 시설에 대하여 빗물이용 시설을 설치하도록 규정하고 있다(Kang *et al.*, 2015). 또한, 서울, 대전, 대구, 광주 등의 지방자치단체에서는 빗물이용 시설 확대를 위해 공동 및 단독주택, 근린생활시설, 유치원, 어린이집 등 다양한 시설에 대하여 빗물저금통 설치 지원 사업을 시행하고 있다.

빗물이용시설의 설치를 법·제도적으로 의무화하고, 사회적으로 지원함에 따라 국내의 빗물이용시설의 설치 사례는 해마다 증가하고 있다. 실제로, Lee and Han (2019)에 의하면, 2010년의 빗물이용시설은 전국에 337개였던 것이, 2012년에 670개, 2013년 968개, 2014년 1,369개로 매년 40% 이상의 증가율을 보였다. 이러한 추세는 빗물이용시설의 계획과 설계에 대한 수요가 매년 증가함을 의미한다. 하지만 빗물이용시설의 저류 용량은 강수량, 지붕 면적, 용수 수요량 등의 지역적 영향을 크게 받으므로 표준화하여 계획되기 어렵다(Campisano and Modica, 2012). 따라서 빗물이용시설을 효과적이고, 효율적으로 계획할 수 있는 도구가 요구된다.

빗물이용시설 설치에 있어서 가장 중요하게 고려되어야 할 부분은 빗물이용시설의 저류 용량 산정에 관한 것이다(Park and Kwak, 2007). 그리고 이러한 빗물이용시설의 저류 용량 산정에는 복잡성과 정교함의 정도에 따라 다양한 방법들이 활용될 수 있다(Islam *et al.*, 2014). 대표적인 방법들로서, 빠른 분석이 가능하여 사전 설계 단계에서 사용될 수 있는 도식적(graphical) 또는 질량 곡선(mass curve) 방법(Handia *et al.*, 2003; Quadros, 2010; Santos and Pinto, 2013; Matos *et al.*, 2013)과 유입량 및 잠재적 방류량 등과 저류 용량의 관계를 결정하는 통계적 방법(Lee *et al.*, 2000; Guo and Baetz, 2007; Su *et al.*, 2009; Raimondi and Becciu 2014)이 있다. 가장 많은 연구자들이 수행한 물 수지(water balance) 기반의 모의(simulation) 방법에 관한 연구들에서는 다양한 기법들이 활용되었다(Fewkes and Butler, 2000; Panigrahi, 2001; Villarreal and Dixon, 2005; Ghisi and Ferreira, 2007; Ghisi *et al.*, 2007; Imteaz *et al.*, 2011; Campisano and Modica,

2012; Santos and Pinto, 2013; Islam *et al.*, 2014). 한편, 국내에서는 Han *et al.* (2004)이 빗물 이용률, 상수도 대체율, 사이클수, 빗물 사용일수와 같은 빗물 운전인자의 선택도표를 활용한 빗물이용시설의 용량 결정에 관한 연구를 수행하였다. Choi *et al.* (2011a)은 신뢰도 평가 모형인 SARET (storage and reliability estimation tool)을 이용하여 빗물이용시설의 신뢰도 평가에 활용하였다. 또한, Kang *et al.* (2015)은 상용 프로그램인 SWMM의 LID (low impact development) 기능을 이용하여 강우-유출 분석과 빗물이용시설의 설계에 관한 동시 해석 방법과 이에 따른 홍수 저감 및 비점오염 저감의 분석 사례를 제시하였다.

상기의 연구들은 공통적으로 빗물이용시설의 적정 규모를 산정하기 위해 모의 방법 또는 통계적인 방법에 의한 반복적인 계산을 포함하고 있다. 실제로 빗물이용시설의 용량을 계획하는 실무에서는 다양한 저류 용량에 대하여 공급 보장을, 우수 이용률 등을 분석하기 위해 반복적으로 모의 운영을 수행하는 시행착오법(trial and error method)이 사용된다. 이러한 시행착오법은 많은 양의 자료에 대한 반복 계산을 요구하므로 분석에 많은 시간이 소요되고, 계산 상의 오류가 발생할 수도 있다.

본 연구에서는 최적화 기법을 통해 목표 공급량을 만족하는 최소의 저류 용량을 결정할 수 있는 빗물이용시설의 저류 용량 결정 프로그램을 개발하였다. 해당 프로그램의 개발 언어는 Python이고, 최적화 기법에는 입자 군집 최적화(particle swarm optimization; PSO) 알고리즘이 사용되었다. 본 연구에서는 개발된 프로그램을 인천 청라지구에 설치된 빗물이용시설의 설계자료에 적용하여 분석의 적절성을 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1 입자 군집 최적화 기법

새 무리의 이동에 관한 사회적 행동 양식을 기반으로 한 입자 군집 최적화 알고리즘은 각 객체 간의 위치 및 최적해 정보를 공유하면서 전역 최적해(global optimum)를 찾아가는 휴리스틱(heuristic) 기법에 해당된다(Eberhart and Kennedy, 1995). 입자 군집 최적화 알고리즘은 군집을 기반으로 최적해를 수행한다는 점에서 대표적인 진화론적 탐색 기법 중 하나인 유전 알고리즘(genetic algorithm; GA)과 공통점이 있다. 하지만 유전 알고리즘이 교차, 돌연변이 연산자를 이용하여 각 객체가 가지고 있는 위치 정보를 교환하면서 전역해를 탐색하는 반면, 입자 군집 최적화 알고리즘은 이웃 객체들 중 최적해로 판단되는 객체의 위치 정보를 기반으로 기존 해에서

다른 해로 이동하면서 전역해를 탐색한다(Han, 2016).

입자 군집 최적화 알고리즘은 각 군집 내 입자의 위치와 속도를 결정하는 4개의 단계를 통해 전역해를 탐색한다. 첫 번째, 각각의 군집 내 입자들에 대한 현재의 위치 정보를 분석한다. 즉, 현재 상태에 대하여 각각의 군집 내에서 최적의 위치를 가지는 입자를 $pBest$ 로 설정하여 현재의 위치가 이전 위치보다 좋으면 입자 위치가 갱신되고, 그렇지 않으면 유지된다. 두 번째, 각각의 군집 내 $pBest$ 값을 비교하여 전체 군집에 대한 최적의 위치인 $gBest$ 를 평가한다. 세 번째, $pBest$ 와 $gBest$ 의 정보를 이용하여 속도를 갱신한다. 새로운 속도에 관한 계산식은 Eq. (1)과 같다.

$$v_{i,t+1} = v_{i,t} + \alpha\epsilon_1[pBest_{i,t} - x_{i,t}] + \beta\epsilon_2[gBest_t - x_{i,t}] \quad (1)$$

여기서, i 는 입자의 번호이고, t 는 반복 계산의 횟수이다. ϵ_1 과 ϵ_2 는 0에서 1 사이의 난수(random variable)이고, α 와 β 는 상수이다. 네 번째, Eq. (2)를 이용하여 입자의 위치를 갱신한다.

$$x_{i,t+1} = x_{i,t} + v_{i,t+1} \quad (2)$$

상기에서 기술된 네 가지의 단계는 최적해 탐색의 수렴 기준을 만족시킬 때까지 반복된다. Fig. 1은 입자 군집 최적화 알고리즘의 전역해 탐색 과정을 흐름도로 나타낸 것이다(Le et al., 2019).

2.2 빗물이용시설의 모의 운영 모형

본 연구에서는 빗물이용시설의 저류 용량 결정을 위해 목표 공급량과 보장률(reliability)의 개념(Eq. (5))을 사용한다. 즉, 본 연구의 목적은 목표한 보장률을 공급할 수 있는 빗물이용시설의 최소 규모(저류 용량)를 결정하는 것이다. 보장률은 장기간의 모의 운영에 의해 계산될 수 있으므로 빗물이용시설

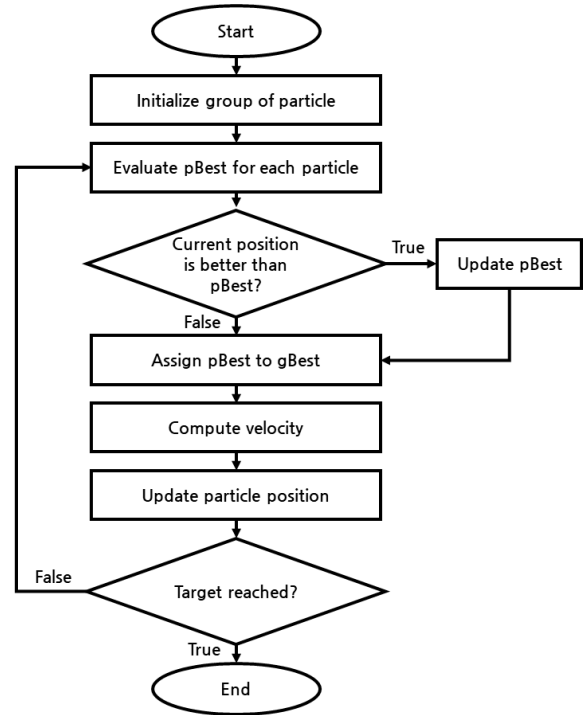


Fig. 1. Particle swarm optimization algorithm (Le et al., 2019)

에 대한 모의 운영 모형이 필요하다.

본 연구에서는 빗물이용시설의 모의 운영 모형 구성을 위해 저수지 질량 보존식(reservoir mass balance equation)을 이용하였다. 그리고 공급량(yield)과 방류량(release)의 결정은 가용수량, 저류 용량, 목표 공급량 등을 고려하여 결정하였다. Table 1은 빗물이용시설의 모의 운영 모형에 사용된 수식들을 나타낸 표이다. Table 1에서 기호의 하첨자로 사용된 t 는 모의 운영의 시간 간격을 나타내는데, 금회 연구에서는 일(日) 단위로 구성하였다. S_t, I_t, Y_t, R_t 는 각각 t 기간에 대한 빗물이용시설의 저류량(storage), 유입량(inflow), 공급량(yield), 방류량(release)이다. T_t 는 기간 t 의 목표 공급량(target draft)이

Table 1. Equations of simulation model for rainwater harvesting

Classification	Simulation model		Remark
	Condition	Equation	
Mass balance equation	-	$S_t = S_{t-1} + I_t - Y_t - R_t$	
Yield determination	$S_{t-1} + I_t \geq T_t$	$Y_t = T_t$	
	$S_{t-1} + I_t \leq T_t$, and $S_{t-1} \neq 0$	$Y_t = S_{t-1}$	
Release determination	$S_{t-1} + I_t \leq T_t$, and $S_{t-1} = 0$	$Y_t = 0$	
	$S_{t-1} + I_t - Y_t \geq C$	$R_t = S_{t-1} + I_t - Y_t - C$	
	$S_{t-1} + I_t - Y_t < C$	$R_t = 0$	

고, C 는 빗물이용시설의 저류 용량(capacity)이다.

2.3 최적화 알고리즘의 구성

목표 보장률에 대한 최소의 저류 용량을 결정하기 위한 최적화 기법으로 입자 군집 최적화 알고리즘을 이용하였다. 입자 군집 최적화 알고리즘은 다양한 언어(language)로 구성되어 있는데, 본 연구에서는 오픈 소스(open source)로 제공되고 있는 Python의 pswarm을 이용하였다. 참고로 pswarm은 입자 군집 최적화 알고리즘에 제약조건식을 고려할 수 있어 다양한 최적화 문제에 적용될 수 있는 장점이 있다.

목표 보장률에 대한 최소의 저류 용량을 결정하기 위해 구성한 최적화 기법의 목적함수는 빗물이용시설의 저류 용량을 최소화하는 것으로서 Eq. (3)과 같다. 제약조건은 설정된 목표 보장률을 만족시킬 수 있도록 탐색된 저류 용량에 의해 계산된 보장률이 목표 보장률 이상이 되도록 Eq. (4)와 같이 설정하였다. Eq. (5)는 탐색된 저류 용량에 의한 보장률을 산정하기 위한 수식으로서, 전체 기간 중 목표한 우수 공급이 수행된 비율을 나타낸다(KICT, 2004).

$$\text{Minimize } C \tag{3}$$

$$R_{Sim} - R_{Tar} \geq 0 \tag{4}$$

$$R_{Sim} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N L_t}{N} \tag{5}$$

여기서, R_{Sim} 은 모의된 보장률이고, R_{Tar} 은 목표 보장률이다. L_t 는 기간 t 에서 저류량이 '0'일 경우 '1', 아니면 '0'의 논리변수(logical variable)이며, N 은 총 모의 기간이다.

2.4 대상 지역

개발된 물이용시설의 저류 용량 결정 프로그램의 적절성을 검토하고자 기존 설계자료와 비교 검토하였다. 빗물이용시설에 대한 기존 설계 사례로서 한국토지공사(KLC)에서 2007년에 계획한 인천 청라지구의 일부 지역을 대상으로 하였다. 인천 청라지구는 물순환 시스템 시범도시로 지정되어 빗물이용시설 등을 포함한 다양한 물순환 시설이 도입된 지역이다(KLC, 2007).

KLC (2007)에서는 인천기상대의 과거 10년(1995 ~ 2004년)간 기상관측 자료를 이용하여 인천 청라지구의 빗물이용시설에 대한 설치 위치와 용량 결정에 관하여 분석하였다. 기존 설계 자료와 최적화 기법으로 도출된 결과를 비교 검토하기 위한 대상 지역은 인천 청라지구의 1공구에 계획된 빗물이용시설이다(Fig. 2). KLC (2007)에 기술되어 있는 인천 청라지구 1공구에 위치한 빗물이용시설의 집수 면적은 73.92 ha이다. Fig. 3은 1995년부터 2004년까지 인천기상대의 일 단위 강우량 시계열과 인천 청라지구 1공구에 계획된 빗물이용시

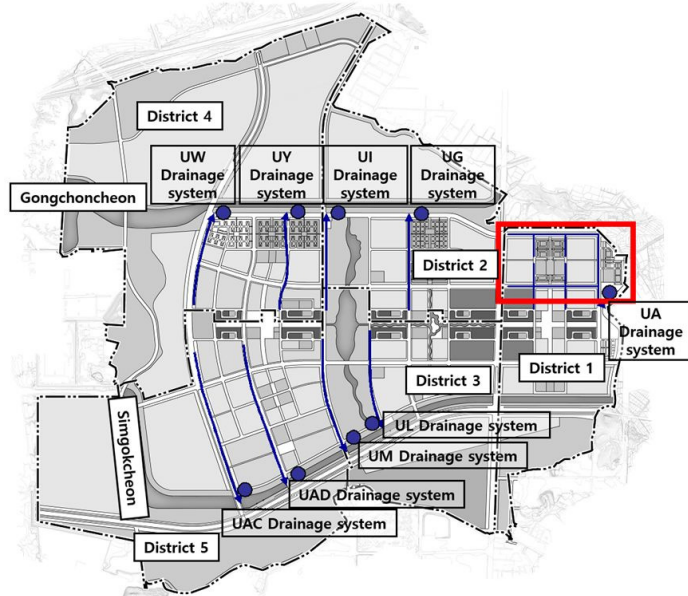


Fig. 2. Study area at Cheongna district in Incheon city

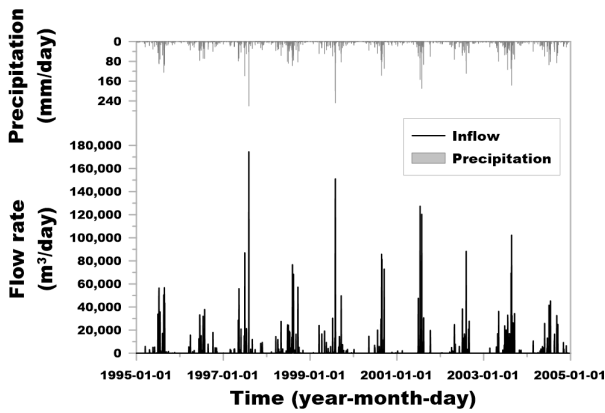


Fig. 3. Precipitation and inflow of rainfall harvesting at Cheongna district 1

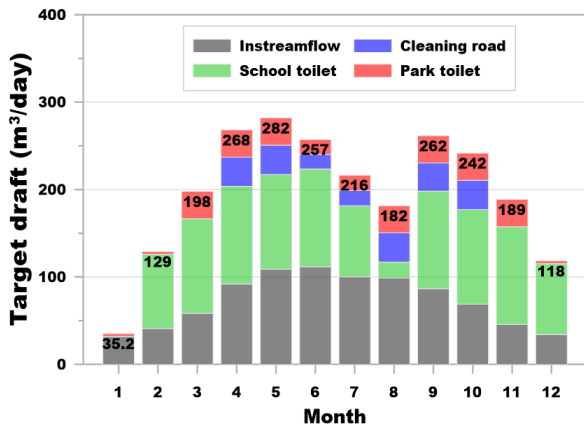


Fig. 4. Target draft of Cheongna district 1

설의 유입량을 나타내는데, 이는 빗물이용시설 설계 당시에 SWMM5를 이용하여 유역 유출 모의된 결과이다. Fig. 4는 해당 빗물이용시설을 이용한 목표 공급량으로서 빗물 사용의 목적은 호소수 유지, 학교 및 공원의 화장실 세정, 도로 노면 청소이다. 빗물 사용의 목적별 목표 공급량은 KLC (2007)에서 인천 청라지구 1공구에 대하여 계획한 양이다. 본 논문에서는 용수 목적별 목표 공급량의 산정 방법을 약술하였으며, 자세한 산정 방법은 KLC (2007)에 기술되어 있다. 학교와 공원의 경우에는 시설별 사용 인구수와 1인당 사용량을 바탕으로 산정되었고, 호소수 유지용수는 호소수의 면적과 인천 기상청의 증발산량을 이용하여 산정되었다. 노면 청소 수량은 도로 청소 연장과 청소수 원단위, 청소시기를 고려하여 산정하였다. 본 연구에서는 Figs. 3 and 4에 제시된 빗물이용시설의 일 단위의 유입량과 목표 공급량을 이용하여 최적화 기법을 이용한 저류 용량 분석에 활용하였다.

3. 연구 내용

3.1 최적화 기법을 이용한 빗물이용시설의 저류 용량 결정 방법

본 연구에서는 2.2절에서 제시한 빗물이용시설의 모의 운영 모형과 2.3절에서 제시한 최적화 알고리즘인 pyswarm을 python 언어를 통해 연계하였다. Fig. 5는 Phyhon을 이용하여 구현한 빗물이용시설의 저류 용량 결정 절차에 관한 모식도를

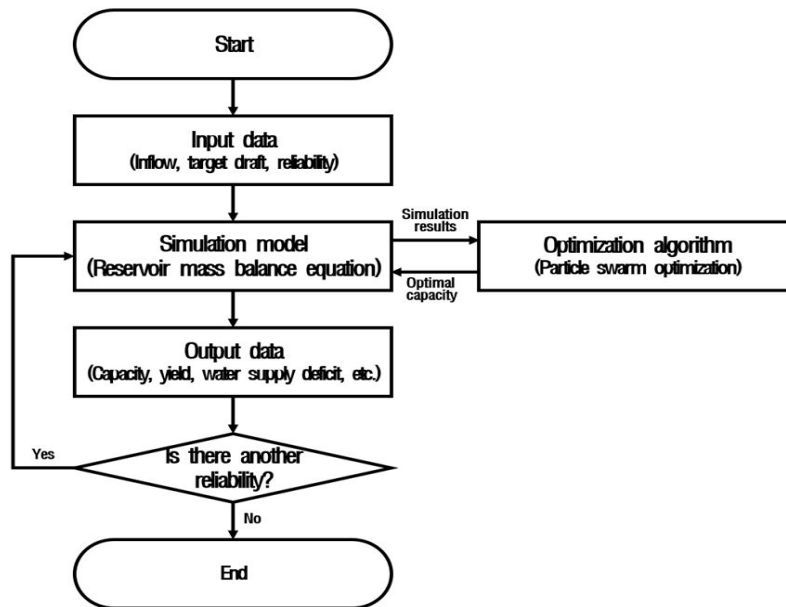


Fig. 5. Process of determination for capacity of rainfall harvesting unit

나타낸다.

최적화 기법을 이용한 빗물이용시설의 저류 용량 결정시 입력자료는 빗물이용시설로 유입되는 유입량 시계열, 목표 공급량 시계열, 목표 보장률이다. 이때 목표 보장률은 분석의 효율을 높이기 위해 여러 개가 동시에 고려될 수 있도록 하였다. 그리고 입력된 유입량 시계열과 목표 공급량 시계열에 따라 다수의 저류 용량 조건에 대하여 모의 운영되고, 최적화 알고리즘에 의해 목표 보장률을 만족하는 최소의 저류 용량을 결정한다. 최종적으로 결정된 저류 용량에 해당하는 저류량 시계열, 용수 공급 시계열, 용수 부족 시계열 등을 출력한 후 종료된다. 단, 다수의 목표 보장률이 입력된 경우에는 각각의 목표 보장률을 만족하는 저류 용량을 탐색하고, 관련된 출력 자료를 생성한다.

3.2 최적화 기법을 이용한 빗물이용시설의 저류 용량 결정 방법의 안정성 및 효율성 검증

입자 군집 최적화 알고리즘은 전역 최적화 기법으로서 초기 조건의 설정에 관계없이 전역 최적해를 탐색할 수 있다. 하지만 적절한 초기 조건과 매개변수가 설정되지 못하면, 목적 함수의 수렴에 많은 시간이 소요될 수 있다. 이에 최적화 알고리즘의 계산 효율을 높이기 위해 pyswarm의 매개변수를 추정하였다. Table 2는 pyswarm에서 제공하는 매개변수별 기본값(default value)과 금회 연구에서 계산 효율을 높이기 위해 결정한 매개변수를 나타낸다. Table 2에서 결정변수(decision variable)인 저류 용량의 상한은 연간 목표 공급량의 총합으로 설정하였으며, Alpha, Beta, Omega는 초기값을 사용하였다. 입자 개수와 반복 계산 횟수의 조합은 여러 차례의 최적화 결과가 소수점 단위 수준에서 유사한 결과로 수렴하는 조합 중 계산 시간이 가장 적게 소요되는 조합을 시행착오법으로 결정하였다. 입자 군집 최적화 알고리즘은 입자 개수보다는 반복

계산 횟수가 줄어들어 따라 전역해 인근의 가능해(지역해)로 수렴하거나 최적해 탐색 이전에 계산이 종료되는 가능성이 큰 것으로 판단되었다.

Table 2에서 결정한 매개변수 조합의 적절성을 검토하기 위해 특정한 조건에서 목적함수의 수렴 정도를 분석하였다. Fig. 6은 인천 청라지구의 1공구에 계획된 빗물이용시설에 대하여 목표 보장률을 65.9%로 설정하여 5차례에 걸쳐 저류 용량을 분석한 결과이다. 참고로 pyswarm은 초기의 입자 위치를 난수로 발생시키기 때문에 분석할 때마다 분석 초기의 목적함수가 달라진다. Fig. 6에서 5차례 분석에 대한 초기의 입자 위치가 서로 상이하기 때문에 모든 분석 시작 시점의 목적함수 값이 상이하다. 하지만 약 20회가 지난 시점부터 유사한 값으로 수렴하고, 최종(50회)적으로 완전히 동일한 값(6,740 m³)이 나타나는 것으로 분석되었다. 또한, 상기의 분석 조건(10년간의 유입량 시계열)에서 각각의 계산에 소요된 시간은 10초 이내로서, 매우 빠르게 분석되어 분석 효율이 높은 것으로 판단되었다.

3.3 개발 프로그램의 정확성 검증

KLC (2007)에서는 임의로 선정된 수많은 저류 용량을 고려하여 구성된 시나리오에 대하여 반복적으로 계산한 후, 공급 보장률과 우수이용률 분석을 통해 적절한 대안을 결정하였다. 따라서 KLC (2007)에서는 저류 용량이 입력자료이고, 보장률이 출력자료이다. 반면에 본 연구에서 개발한 빗물이용시설의 저류 용량 결정 프로그램의 입력자료는 보장률이고, 저류 용량은 출력자료이다. 본 연구에서는 KLC (2007)의 결과와 비교하기 위해 설계 당시의 저류 용량에 따른 분석 결과인 보장률을 입력자료로 설정하여 저류 용량을 분석하였고, 분석된 저류 용량이 KLC (2007)에서 가정한 저류 용량과 일치하는지 검토하였다.

Table 2. Estimation for parameters of pyswarm

Parameters of pyswarm	Default value	Used value	Remark
The number of particles	100	20	Derived by trial and error
The maximum number of iterations	100	50	
Alpha	0.5	0.5	Applied by default value
Beta	0.5	0.5	
Omega	0.5	0.5	
Upper boundary of decision variable	-	654,751	Annual total target yield
Lower boundary of decision variable	-	0	Non-negative condition

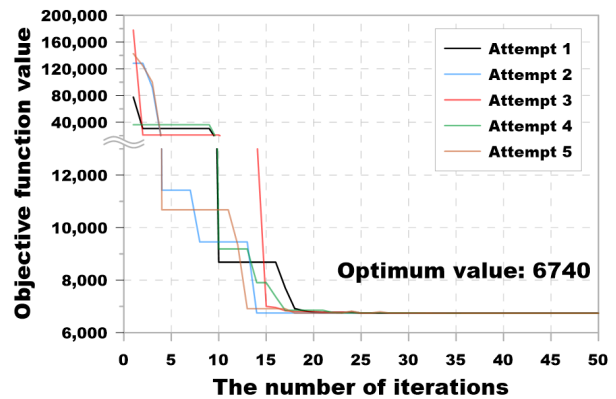


Fig. 6. Exploring optimal solution by optimization algorithm

Figs. 7 and 8은 각각 KLC (2007)과 금회 연구에서 분석한 저류 용량에 따른 보장률과 우수이용률의 변화를 나타낸 그림이다. 우수이용률은 빗물이용시설의 총 유입량에 대한 총 용수 공급량의 비율을 나타내는 지표로서 산정 방법은 Eq. 6과 같다. Fig. 7에 제시된 40가지의 보장률별 저류 용량을 비교한 결과

약 0.6%의 차이만 발생되었다. Tabel 3에는 Fig. 7에 나타난 결과 중 일부를 수치로 나타낸 것이다.

$$RUR = \frac{\sum_{t=1}^N Y_t}{\sum_{t=1}^N I_t} \tag{6}$$

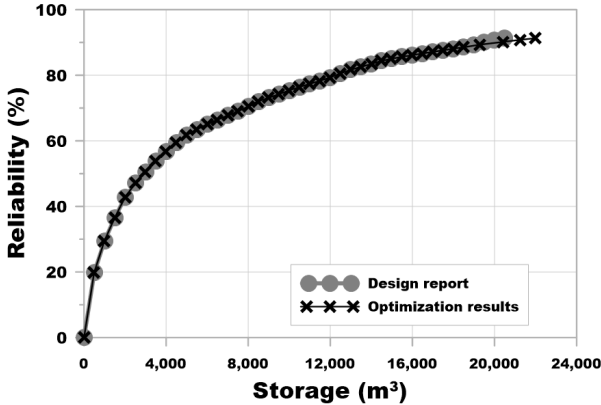


Fig. 7. Comparison of reliability by storage capacity

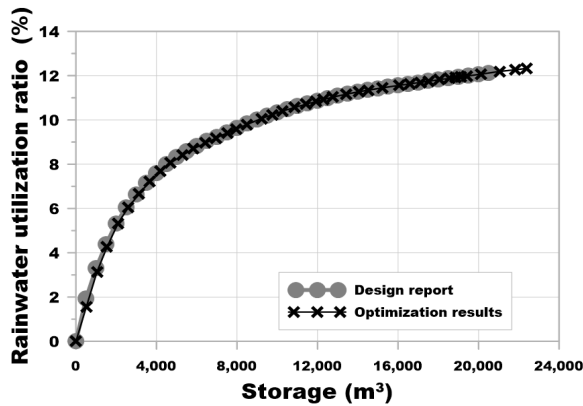


Fig. 8. Comparison of rainwater utilization ratio by storage capacity

Figs. 7 and 8을 통해 금회 개발된 최적화 기법 기반의 저류 용량 산정 프로그램이 반복 계산을 통한 설계 결과와 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. 즉, 금회 개발된 빗물이용시설의 저류 용량 산정 프로그램이 입력한 보장률에 대하여 저류 용량을 적절히 탐색하였다. 참고로 금회 개발된 최적화 기법 기반의 저류 용량 산정 프로그램은 다수의 보장률 조건에 대한 저류 용량 계산이 수 분 내에 일괄 계산되므로 KLC (2007)에서 제시한 보장률보다 많은 조건에 대하여 분석하였다.

3.4 특정한 보장률에 대한 분석 결과

KLC (2007)에서는 인천 청라지구의 1공구에 대하여 목표 공급량 대비 65.9%의 공급 보장률을 가지는 빗물이용시설을 계획하였다. 3.2절에서 기술한 바와 같이 65.9%의 보장률을 고려한 빗물이용시설의 저류 용량은 개발된 프로그램에 의해 6,740 m³으로 결정되었다. 본 절에서는 해당 빗물이용시설에 의한 분석 결과를 제시하였다.

Fig. 9는 결정된 빗물이용시설에 대하여 1995~2004년 기간의 저류 용량 변화를 나타낸 그림이고, Fig. 10은 이를 2004년에 대해서만 나타낸 그림이다. 유사하게 Figs. 11 and 12는 빗물이용시설을 통한 용수 공급을 1995년부터 2004년까지 도시한 그림과 2004년에 대해서만 도시한 그림이다. 또한, Figs. 13 and 14는 각각 빗물이용시설을 통한 용수 공급 부족

Table 3. Comparison between optimization results and design report

Design report (KLC, 2007)			Optimization results		
Input	Output		Input	Output	
Storage (m³)	Reliability (%)	Rainwater utilization ratio (%)	Reliability (%)	Storage (m³)	Rainwater utilization ratio (%)
500	19.8	1.93	19.8	493	1.55
1,000	29.5	3.31	29.5	994	3.14
3,000	42.8	6.62	42.8	2,991	6.64
5,000	61.8	8.32	61.8	4,993	8.41
10,000	75.3	10.4	75.3	9,981	10.4
15,000	85.0	11.4	85.0	14,959	11.4
20,000	90.8	12.1	90.8	20,420	12.1

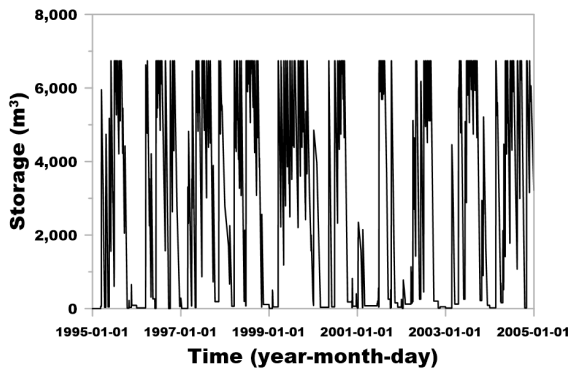


Fig. 9. Analyzed storage for the rainwater harvesting from 1995 to 2004

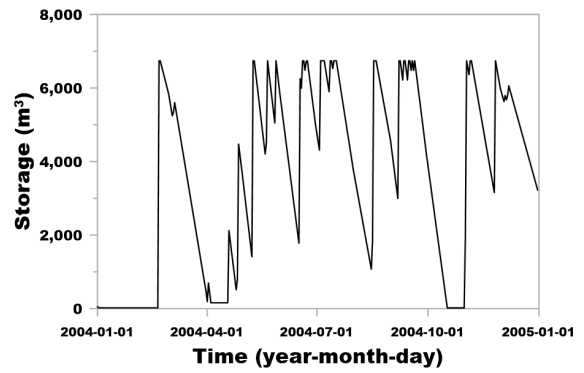


Fig. 10. Analyzed storage for the rainwater harvesting in 2004

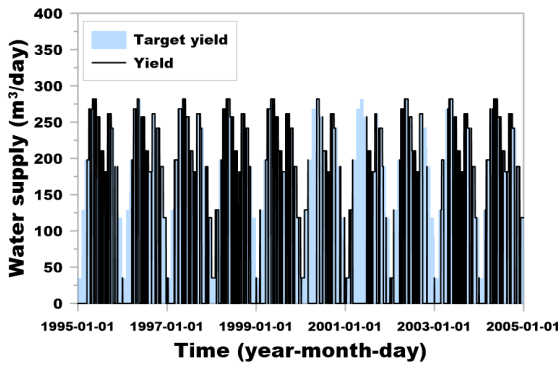


Fig. 11. Analyzed yield for the rainwater harvesting from 1995 to 2004

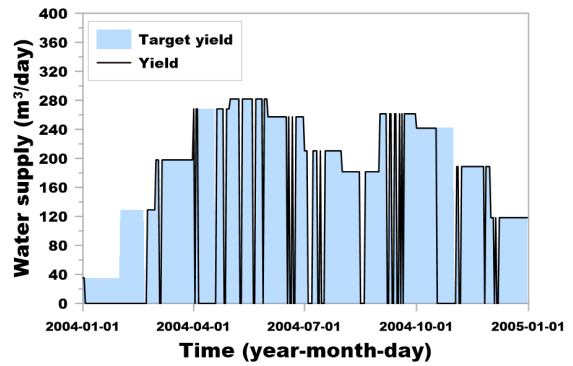


Fig. 12. Analyzed yield for the rainwater harvesting in 2004

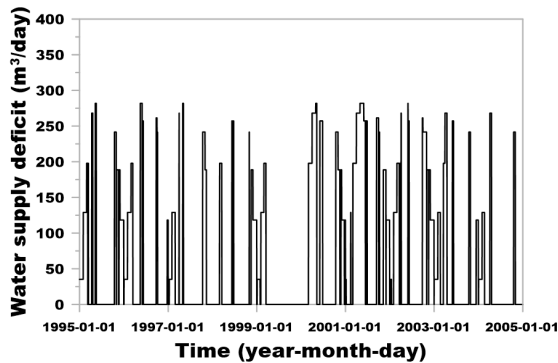


Fig. 13. Analyzed water supply deficit for the rainwater harvesting from 1995 to 2004

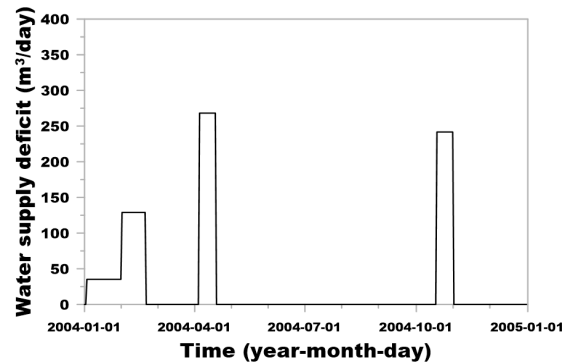


Fig. 14. Analyzed water supply deficit for the rainwater harvesting in 2004

량을 1995 ~ 2004년의 기간과 2004년에 대하여 나타낸 그림이다.

KLC (2007)에서는 강우 시 빗물이용시설에 오염물이 유입되는 것으로 인한 오염물 공급을 차단하는 것으로 가정하여 강우 시에는 목표 공급량을 ‘0’으로 설정하였다. 본 연구에서는 해당 설계 방법과 동일한 조건을 고려하였는데, 이에 따라, Figs. 11 and 12에서 목표 공급량이 ‘0’이 되는 시기가

발생하는 것을 볼 수 있고, Figs. 13 and 14에서 해당 시기의 용수 공급 부족량이 ‘0’으로 분석되었다.

Table 4는 1995년부터 2004년까지 1년 단위로 공급 보장을 및 우수이용률을 산정한 결과를 나타낸 표이다. Table 4를 보면, 연중 빗물이용시설로 유입되는 총 물의 양과 보장이 비례관계에 있지 않음을 확인할 수 있다. 이는 홍수기에 집중된 우리나라의 강우 특성에 기인한 것으로서, 갈수기에도 비

Table 4. Annual analysis results for yield, reliability, and rainwater utilization ratio

Year	Total inflow (1,000 m ³)	Total yield (1,000 m ³)	Reliability (%)	Rainwater utilization ratio (%)
1995	529.6	40.49	55.6	7.6
1996	261.2	47.31	68.2	18.1
1997	501.9	51.92	75.6	10.3
1998	614.0	50.22	80.5	8.2
1999	593.1	55.74	81.4	9.4
2000	433.1	32.45	56.4	7.5
2001	469.5	24.94	47.1	5.3
2002	333.7	37.84	55.9	11.3
2003	629.6	43.30	66.6	6.9
2004	414.6	51.11	78.4	12.3

교적 많은 강우량이 포함된 기간이 공급 보장률이 크다. 그 예로, 2004년은 앞서 제시한 10년 중 3번째로 유입량이 적었으나, 공급 보장률은 3번째로 크다.

4. 결론

일반적으로 빗물이용시설의 저류 용량을 계획하는 경우, 임의의 여러 저류 용량을 가정하여 저수지 질량 보존식 기반의 모의 운영을 통해 반복적으로 분석한다. 그리고 각각의 저류 용량에 대한 공급 보장률과 우수이용률 등을 검토하여 적절한 규모를 결정한다. 이러한 분석 방법은 매우 다양한 분석 시나리오를 구성하여 수행되어야 하므로 많은 시간과 노력이 요구된다.

이와 같은 분석 방법을 개선하기 위해 본 연구에서는 최적화 기법을 이용하여 임의의 공급 보장률에 해당하는 빗물이용시설의 저류 용량을 짧은 시간에 직접적으로 결정할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 해당 저류 용량 산정 프로그램의 개발 언어는 Python이고, 저수지 질량 보존식 기반의 모의 운영 모형과 Python의 입자 군집 최적화 알고리즘인 pyswarm을 연계하여 구성되었다.

본 연구에서는 개발한 빗물이용시설의 저류 용량 산정 프로그램을 인천 청라지구 1공구에 설치된 빗물이용시설에 적용하여 적절성을 검토하였다. 우선, 최적화 알고리즘의 적절한 매개변수 추정을 통해 계산 시간의 효율을 높였고, 분석의 안정성을 확인하였다. 그리고 설계 당시와 금회 분석한 빗물이용시설의 저류 용량에 따른 공급 보장률을 비교하여 분석의

정확성을 검증하였다.

개발된 최적화 기법을 이용한 빗물이용시설의 저류 용량 산정 프로그램은 단일 목표 보장률에 대하여 10초 이내에 최적의 값을 결정할 수 있다. 또한, 다양한 목표 보장률에 대하여 일괄적인 계산이 가능하다. 따라서 금회 개발된 프로그램은 증가하는 빗물이용시설의 설계 수요에 효과적으로 대응할 수 있고, 빗물이용시설의 저류 용량 산정에 관한 기술력 제고에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 한국환경사업기술원의 지능형 도시수자원 관리사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2019002950004).

Referenes

- Campisano, A., and Modica, C. (2012). "Optimal sizing of storage tanks for domestic rainwater harvesting in Sicily." *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 63, pp. 9-16.
- Choi, C.H., Park, M.J., Baek, C.W., and Kim, S.D. (2011a). "Application of rainwater harvesting system reliability model based on non-parametric stochastic daily rainfall generator to Haundae district of Busan." *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol. 27, No. 5, pp. 634-645.
- Choi, J.H., Kim, D.M., and Lee, M.H. (2011b). "Active rainwater utilization within apartment complex." *Proceedings of 2011 Conference*, The Korean Regional Development Association, pp. 1-11.
- Eberhart, R., and Kennedy, J. (1995). "A new optimizer using particle swarm theory." *Proceedings Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, IEEE, Nagoya, Japan, pp. 39-43.
- Fewkes, A., and Butler, D. (2000). "Simulating the performance of rainwater collection systems using behavioural models." *Building Services Engineering Research and Technology*, Vol. 21, No. 2, pp. 99-106.
- Ghisi, E., Bressan, D.L., and Martini, M. (2007). "Rainwater tank capacity and potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Southeastern Brazil." *Building and Environment*, Vol. 42, No. 4, pp. 1654-1666.
- Ghisi, E., and Ferreira, D.F. (2007). "Potential for potable water savings by using rainwater and greywater in a multi-storey residential building in Southern Brazil." *Building and Environment*, Vol. 42, No. 7, pp. 2512-2522.
- Guo, Y., and Baetz, B.W. (2007). "Sizing of rainwater storage units for

- green building applications.” *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 197-205.
- Han, B. (2016). *Design of dimension exchange particle swarm optimization technique with improved convergence performance*. Ph. D. dissertation, Hanyang University.
- Han, M., Han, M., and Kim S. (2004). “A consideration in determining the tank size of rainwater harvesting system in buildings.” *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 18, No. 2, pp. 99-109.
- Handia, L., Tembo, J.M., and Mwiindwa, C. (2003). “Potential of rainwater harvesting in urban Zambia.” *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 28, pp. 893-896.
- Imteaz, M.A., Shanableh, A., Rahman, A., and Ahsan, A. (2011). “Optimisation of rainwater tank design from large roofs: A case study in Melbourne, Australia.” *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 55, No. 11, pp. 1022-1029.
- Islam, M.M., Afrin, S., Jadid, R., and Rahman, M.M. (2014). “Development of a design tool for sizing storage tank of rainwater harvesting system in coastal areas of Bangladesh under future climatic scenario.” *Proceedings 2nd International Conference on Advances in Civil Engineering*, CUET, Chittagong, Bangladesh.
- Kang, T., Koo, Y., and Lee, S. (2015). “A study on design method and effect analysis of rainwater harvesting facility for efficient use.” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 2, pp. 353-361.
- Korea Institute of Construction Technology (KICT) (2004). *Development of rainwater storage and utilization technology*. TRKO 200700008684, Ministry of Science and Technology, Korea.
- Korea Land Corporation (KLC) (2007). *Incheon Cheongna district free economic zone development project-measures to introduce a sound water circulation system*. Korea Land Corporation, Korea.
- Le, L.M., Ly, H., Pham, B.T., Le, V.M., Pham, T.A., Nguyen, D., Tran, X., and Le, T. (2019). “Hybrid artificial intelligence approaches for predicting buckling damage of steel columns under axial compression.” *Materials*, Vol. 12, No. 10, 1670, pp. 1-18.
- Lee, K.T., Lee, C.D., Yang, M.S., and Yu, C.C. (2000). “Probabilistic design of storage capacity for rainwater cistern systems.” *Journal of Agricultural Engineering and Research*, Vol. 77, No. 3, pp. 343-348.
- Lee, T.G., and Han, Y.H. (2019). “Improvement of related regulations to accomplish water circulation in ecological architecture: focusing on rainwater utilization status analysis.” *Journal of Korea Institute of Ecological Architecture and Environment*, Vol. 19, No. 5, pp. 93-97.
- Matos, C., Santos, C., Pereira, S., Bentes, I., and Imteaz, M. (2013). “Rainwater storage tank sizing: Case study of a commercial building.” *International Journal of Sustainable Built Environment*, Vol. 2, No. 2, pp. 109-118.
- Panigrahi, B. (2001). *Water balance simulation for optimum design of on-farm reservoir in rainfed farming system*. Ph. D. dissertation, Indian Institute of Technology, Kharagpur, India.
- Park, S., Kim, S., and Kwak, D. (2007). “An analysis of rainwater quality in rainwater harvesting system at dormitories in Seoul National University, Seoul, Korea.” *Journal of Society of Rain Masters*, Vol. 1, No. 1, pp. 96-102.
- Quadros, C.S. (2010). *Rainwater harvesting case study: FCT/UNL campus*. Master thesis, Universidade Nova de Lisboa, Lisbon, Portugal.
- Raimondi, A., and Becciu, G. (2014). “Probabilistic design of multi-use rainwater tanks.” *Procedia Engineering*, Vol. 70, pp. 1391-1400.
- Santos, C., and Pinto, F.T. (2013). “Analysis of different criteria to size rainwater storage tanks using detailed methods.” *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 71, pp. 1-6.
- Su, M.D., Lin, C.H., Chang, L.F., Kang, J.L., and Lin, M.C. (2009). “A probabilistic approach to rainwater harvesting systems design and evaluation.” *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 53, No. 7, pp. 393-399.
- Villarreal, E.L., and Dixon, A. (2005). “Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrköping, Sweden.” *Building and Environment*, Vol. 40, No. 9, pp. 1174-1184.