creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사학위논문

빗물 이용 활성화 및 온실가스 감축을 위한 녹색건축 인증제도의 개선방안

Improvement of the G-SEED to Enhance Rainwater Utilization and Reduce Greenhouse Gas Emissions

2021년 8월

서울대학교 대학원

건설환경공학부

박 진

빗물 이용 활성화 및 온실가스 감축을 위한 녹색건축 인증제도의 개선방안

지도교수 한 무 영

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2021년 8월

서울대학교 대학원
건설환경공학부
박 진

박진의 석사 학위논문을 인준함
2021년 8월

위 원 장 김 재 영

부위원장 한 무 영

위 원 최 용 주

국 문 초 록

2030년 온실가스 배출량 전망치 대비 37% 감축목표와 2050 탄소 중립선언과 같이 국가적으로 온실가스 감축이 중요한 과제로 떠오르는 가운데 국내 온실가스 배출량은 매년 증가하고 있고, 특히 건물 부문의 온실가스 배출량은 전체의 약 20%를 차지하고 있어 이에 대한 감축이 크게 요구되어진다.

건축물에서의 온실가스 배출량 감축과 녹색건축물 확대를 위하여 「녹색건축물 조성지원법」근거하에 '녹색건축 인증제도'가 시행되고 있다. 그러나, 빗물 및 유출지하수 이용 인증항목 내에서 평가하고 있는 빗물이용시설은 단순히 빗물 저류조의 용량을 평가인자로 적용하고 있어 성능을 정량적으로 평가할 수 없고, 유지관리에 관한 규정이 미흡하다는 한계점을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 현 녹색건축 인증제도의 빗물이용시설 관련 평가 기준과 설계 및 유지관리 기준을 분석하여 문제점을 도출하고, 이를 개선하기 위한 방안을 제시하였다.

먼저, 빗물이용시설의 성능을 평가하기 위하여 일별 물수지 모델인 RSUD 모델과 평가인자로 RUR과 WSE를 선정하고, 다목적 빗물이용시설을 위한 설계인자들을 도출하였으며 신축, 기존, 리모델링 건축물을 대상으로 하는 평가 기준을 제시하였다. 그리고 빗물 이용에 따른 온실가스 감축 효과를 분석하기 위하여 온실가스 배출 원단위를 연도별, 지역별로 산출하였고, 사례를 이용하여 현 녹색건축 인증제도의 평가 기준과 제시된 평가 기준을 적용한 경우를 비교 분석하였다. 마지막으로, 빗물이용시설의 성능 유지를 위하여 빗물의 수질 기준에 적합한 처리시설의 설계기준과 수질 및 수량 모니터링 기준을 제시하였다. 그 결과 현 녹색건축

인증제도와 달리 빗물이용시설의 성능에 따라 변별력있게 배점을 부여할 수 있고, 시설을 안정적으로 운영할 수 있음을 확인하였다.

대체수자원인 빗물을 이용함으로써 기후변화에 대응하고, 국가의 온실가스 감축 목표를 달성하기 위해서는 빗물이용시설을 단순히 설치하는 데에 그치는 것이 아니라, 시설의 설계 및 유지관리에 관한 다양한 항목들을 자세하고 정기적으로 평가함으로써 성능을 유지하는 것이 중요하다. 이에 본 연구의 결과가 녹색건축 인증제도 내 빗물이용시설 평가항목 개선을 위한 근거자료로 활용도가 있을 것이라 사료된다.

주요어 : 빗물 이용, 온실가스 감축, 녹색건축 인증제도, 빗물이용시설, 성능평가, 유지관리

학 번 : 2019-29750

목 차

제 1 장 서 론 ····· **1**

제 1 절 연구의 배경 ····· **1**

제 2 절 연구의 목적 ····· **3**

제 3 절 연구의 범위 및 방법 ····· **4**

제 2 장 이론적 고찰 ····· **6**

제 1 절 녹색건축의 개념 ····· **6**

제 2 절 녹색건축 인증제도 개요 ····· **7**

제 3 절 빗물이용시설 평가항목 고찰 ····· **12**

제 3 장 인증대상에 따른 평가기준 제시 ····· **13**

제 1 절 성능 평가방법 및 평가인자 선정 ····· **13**

1. 평가방법 ····· 13
2. 평가인자 ····· 17

제 2 절 설계인자 도출 ····· **19**

1. 강우 ····· 19
2. 집수효율 ····· 21
3. 저수위 및 고수위 ····· 22
4. 저류조 용량 및 수요량 ····· 24

제 3 절 평가기준 제시 ····· **30**

1. 신축 건축물을 위한 평가기준 ····· 30
2. 기존 및 리모델링 건축물을 위한 평가기준 ····· 31

제 4 장 평가기준 적용에 따른 성능 분석 ····· 32
제 1 절 온실가스 배출 원단위 산출 ····· 33
제 2 절 평가기준 적용에 따른 비교 ····· 34

제 5 장 성능 유지를 위한 가이드라인 제시 ····· 39
제 1 절 처리시설 설계 가이드라인 ····· 39
제 2 절 수질 및 수량 모니터링 가이드라인 ····· 46

제 6 장 결 론 ····· 49

참고문헌 ····· 51
Abstract ····· 58

표 목 차

표 1 The weighting distribution for different types of buildings based on the G-SEED evaluation criteria ····· 9
표 2 Credit allocation for different building types under water circulation management criteria ····· 10
표 3 Credit criteria for rainwater harvesting system in G-SEED ····· 11
표 4 Factors for evaluating the performance of rainwater harvesting system ····· 18
표 5 Variation of RUR(%) when V/A ratio increase by 0.01
26
표 6 Variation of RUR(%) when V/A ration increase by 0.01 (Continued) ····· 27
표 7 Variation of WSE(%) when D/A ration increase by 0.001 ····· 28
표 8 Variation of WSE(%) when D/A ration increase by 0.001 (Continued) ····· 29
표 9 GHG reduction and rainwater utilization in accordance with RUR range under the proposed evaluation system 35
표 10 Rainwater quality standards ····· 40
표 11 Rainwater quality standards (Continued) ····· 41
표 12 The water quality parameters observed for rainwater harvesting systems installed in Korea ····· 42
표 13 Required water quality levels for different uses in different countries and the measured rainwater quality parameters in Korea ····· 43

표 14 Results of rainwater quality tests (S1: stored rainwater, S2: treated rainwater) ····· 45
표 15 Proposed monitoring schedule ····· 47

그 림 목 차

그림 1 Trend of greenhouse gases emissions in Korea · 1
그림 2 The number of buildings that received the green building certification under G-SEED from 2002 to 2020 (건설기술연구원, 2021) ····· 8
그림 3 Structure of rainwater storage tank and water flow 14
그림 4 Flow chart of RSUD model (Nguyen & Han, 2018) 16
그림 5 Difference in RUR when rainfall pattern for 2018 and 2020 was selected as the representative rainfall pattern when analyzing RUR from 2011 to 2020 ····· 20
그림 6 Rainfall pattern for the year 2018 ····· 21
그림 7 Design considerations of rainwater storage tank for multiple purpose water usage ····· 22
그림 8 Variation of the RUR with varying water levels under different daily water demand when a tank volume of 5 m3 23
그림 9 Variation of the RUR with varying water levels under different a tank volume when daily water demand of 0.5 m3/d 23
그림 10 Variation of the RUR with varying V/A ratios under different D/A ratios ····· 25
그림 11 Variation of the WSE with varying V/A ratios under different D/A ratios ····· 25

그림 12 Annual greenhouse gas (GHG) intensity ····· 34
그림 13 The average regional GHG intensity considering a period of 10 years ····· 34
그림 14 The number of rainwater harvesting systems based on the location ····· 36
그림 15 Features of the existing rainwater harvesting systems 36
그림 16 When the evaluation criteria of G-SEED was applied to existing rainwater harvesting systems ····· 37
그림 17 When the proposed evaluation criteria was applied to existing rainwater harvesting systems ····· 38
그림 18 Design of the storage tank ····· 44
그림 19 Proposed water sampling points in rainwater harvesting systems for monitoring ····· 46

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

신기후체제(Post-2020)가 출범함에 따라 우리나라는 2030년 온실가스 배출량 전망치(Business As Usual, BAU) 대비 37% 감축하는 목표를 제시하였으며 2050년까지 탄소의 순 배출량이 0이 되도록 하는 탄소중립을 이루겠다고 선언하였다(환경부 외, 2018).

이처럼 온실가스 감축이 중요한 과제로 떠오르는 가운데 국내 온실가스 배출량은 매년 증가하고 있고, 2030년에는 851 백만톤 CO_2eq에 달할 것으로 전망되고 있다(온실가스종합정보센터, 2020)(그림 1). 특히 건물 부문의 온실가스 배출량은 2015년 기준으로 한국의 전체부문 온실가스 배출량 중 약 20%를 차지하고 있어 이에 대한 감축이 크게 요구된다(김태형, 2018).

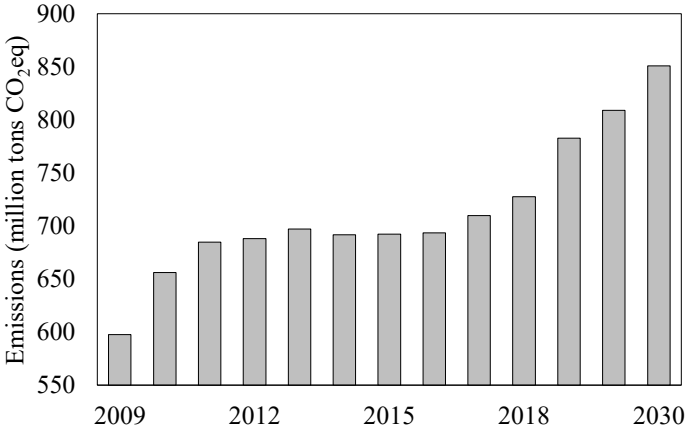


그림 1 Trend of greenhouse gases emissions in Korea

우리나라에서는 건축물에 대한 환경부하를 줄이기 위하여 2002년에 친환경 건축물 인증제를 처음으로 도입하였고, 이후 건축물에서의 온실가스 배출량 감축과 녹색건축물 확대를 위해 2013년 2월에 「녹색건축물 조성지원법」이 시행됨에 따라 기존의 친환경 건축물 인증제가 녹색건축 인증제로 변경하게 되었다.

녹색건축 인증제도가 시행된 이래로 지속적으로 인증기준을 개정하면서 인증대상을 확대하는 등의 외형적인 성장을 이루었지만, 최근 서울시 녹색건축 인증 건축물에 대한 실태조사 결과에서 평가항목 중 낮은 성능과 사용률을 보유한 아이템도 있는 것으로 미루어 보아, 항목별 인증기준에 대한 세부적인 보완작업도 필요할 것으로 보인다(서울특별시, 2016).

빗물이용시설 평가항목의 경우 일정 용량 이상의 빗물 저류조 설치를 기준으로 평가하고 있어, 건축물의 친환경성을 정량적으로 평가한다는 녹색건축 인증제도의 취지와 달리 시설의 성능이 제대로 평가되고 있지 않다. 또한, 설계 및 유지관리 기준이 미흡하여 시설이 적절하게 설계되지 않거나 사후관리가 이루어지지 않아 성능이 감소하고, 시설의 사용률이 저하되는 등의 문제점을 지니고 있다.

이에 본 연구에서는 빗물 및 유출지하수 이용 인증항목에서 평가하고 있는 빗물이용시설에 관한 평가기준과 설계 및 유지관리 기준의 한계점을 개선할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

제 2 절 연구의 목적

본 연구의 목적은 녹색건축 인증제도 내 빗물 및 유출지하수 이용 인증항목에서 평가하고 있는 빗물이용시설에 대한 평가 기준과 설계 및 유지관리 기준을 개선하는 데에 있다.

이를 위해 빗물이용시설의 성능평가를 기반으로 하는 평가 기준을 제시하고, 기준 적용에 따른 빗물이용시설의 환경성능을 분석하였다. 또한, 시설의 성능을 유지하기 위한 설계 및 유지관리 가이드라인을 제시하였다. 이에 따른 세부적인 연구 목적은 다음과 같다.

(1) 빗물이용시설의 성능을 평가할 수 있는 방법과 평가인자 및 설계인자를 토대로 신축, 기존, 리모델링 건축물을 위한 평가 기준을 제시한다.

(2) 빗물 이용에 따른 온실가스 감축 효과를 산정하기 위하여 온실가스 배출 원단위를 산출하고, 현 녹색건축 인증제도의 평가 기준과 제시된 평가 기준을 적용했을 때의 빗물 이용 및 온실가스 감축 효과를 비교 분석한다.

(3) 빗물이용시설의 성능을 유지하기 위한 설계 및 유지관리 가이드라인을 제시한다.

제 3 절 연구의 범위 및 방법

본 연구는 온실가스 감축을 통해 기후변화에 대응하기 위한 국가적 정책에 기반하여 빗물이용시설을 연구대상으로 선정하였다. 빗물이용시설은 수자원을 확보함으로써 홍수 피해 방지 및 가뭄 대비로 기후변화에 대한 대응책이 될 수 있으며 상수를 공급하는 과정에서 소요되는 에너지도 절약할 수 있어 온실가스 감축 효과도 가져올 수 있다(명수정, 2010).

이러한 이유로 녹색건축 인증제도 내 빗물 및 유출지하수 이용 인증항목에서 평가하고 있는 빗물이용시설에 대한 기준을 연구의 범위로 설정하였다. 녹색건축 인증제도에서는 평가항목을 빗물저수조로 명시하고 있지만, 단순히 빗물을 저류하는 것이 목적이 아니라 화장실 세정용수, 조경용수, 살수용수, 청소용수 등 다양한 용도로 사용하는 것을 목적으로 하기 때문에 본 연구에서는 빗물이용시설이라고 명칭하고자 한다.

그리고 녹색건축 인증제도에서 현재 평가기준으로 적용하고 있는 2016-5 version 2에서는 신축, 기존, 그린 리모델링 건축물에 따라 기준을 다르게 적용하여 평가하고 있다. 그러나 기존 건축물 인증기준은 최초 인증을 받은 건축물에 대한 재인증과 일반적인 리모델링 건축물을 대상으로 하고 있고, 그린 리모델링 인증기준은 그린 리모델링 사업지원을 받은 건축물을 평가대상으로 한정짓고 있어 제도의 적용 범위가 다소 모호하고, 평가에 혼동을 줄 수 있다(Hyun et al., 2017). 따라서 본 연구에서는 기존 건축물 인증기준과 리모델링 건축물 인증기준으로 구분하여, 기존 건축물 인증기준은 재인증 건축물을 대상으로 하고, 리모델링 건축물 인증기준은 일반적인 리모델링 건축물과 그린 리모델링 건축물을 대상으로 하였다.

본 연구에서는 빗물이용시설 관련 기준에 대한 개선안을 제시하기 위하여 다음의 방법으로 연구를 진행하였다.

2장에서는 국내의 녹색건축 관련법에서 정의하고 있는 녹색건축의 개념을 분석하여 본질적인 목적을 도출하고, 녹색건축 인증제도의 빗물이

용시설 관련 평가 기준과 설계 및 유지관리 기준을 분석하여 문제점을 도출함으로써 분석의 타당성을 제시하였다.

3장에서는 빗물이용시설의 성능을 평가할 수 있는 방법과 평가인자를 선정하고, 기후변화에 대응하기 위하여 다목적 빗물이용시설을 위한 설계인자를 도출하였다. 그리고 신축, 기존, 리모델링 건축물을 대상으로 하는 평가 기준을 각각 제시하였다.

4장에서는 제시된 평가 기준 적용에 따른 온실가스 감축 효과를 산정하기 위하여 온실가스 배출 원단위를 연도별, 지역별로 산출하고, 현 녹색건축 인증제도의 평가 기준과 제시된 평가 기준을 적용했을 때의 빗물이용 효과와 그에 따른 온실가스 감축 효과를 비교 분석하였다.

5장에서는 문헌연구를 통해 녹색건축 인증제도에서 규정하고 있는 처리시설만으로도 빗물 수질 기준에 만족하는지 검토하고, 수질 기준에 적합한 처리시설을 제시하였으며 지속적인 유지관리를 통한 성능 확보를 위해 수질 및 수량 모니터링 가이드라인을 제안하였다.

제 2 장 이론적 고찰

제 1 절 녹색건축의 개념

녹색건축 인증제도와 관련한 우리나라 법령에서는 녹색건축 이전에 이와 유사한 용어로 친환경건축물을 정의하였다. 2002년에 시행된 「친환경건축물인증제도 세부시행지침」 제 2조(정의)의 1에서는 친환경건축물을 '지속가능한 개발의 실현을 목표로 인간과 자연이 서로 친화하며 공생할 수 있도록 계획·설계되고 에너지와 자원 절약 등을 통하여 환경오염부하를 최소화함으로써 쾌적하고 건강한 거주 환경을 실현한 건축물'로 정의하였다.

이후 시행된 「저탄소 녹색성장 기본법」 제54조(녹색건축물의 확대) 제1항에서는 '에너지이용 효율 및 신·재생에너지의 사용 비율이 높고 온실가스 배출을 최소화하는 건축물'을 녹색건축물이라고 명시하고 있고, 「녹색건축물 조성 지원법」 제2조(정의)에서는 '건축물과 환경에 미치는 영향을 최소화하고 동시에 쾌적한 거주환경을 제공하는 건축물'로 정의하고 있다. 그리고 동법 제16조(녹색건축의 인증)에서는 녹색건축 인증제의 시행목적을 '지속가능한 개발의 실현과 자원절약형이고 자연친화적인 건축물의 건축을 유도하기 위함'이라고 규정되어 있는 것으로 보아 친환경건축물과 그 의미가 유사하다.

따라서 녹색건축 인증제도와 관련된 법령에서 나타난 주요 개념을 중심으로 녹색건축을 재정의하면 '에너지와 자원을 절약하여 온실가스 배출과 환경에 미치는 영향을 최소화하고, 자연친화적이며, 쾌적한 거주환경을 제공하는 건축물'이라고 할 수 있다.

제 2 절 녹색건축 인증제도 개요

녹색건축 인증제도(Green Standard for Energy and Environmental Design, G-SEED)는 건축물의 자재생산단계, 설계, 건설, 유지관리, 폐기에 걸쳐 건축물의 전 과정에서 발생할 수 있는 에너지와 자원의 사용 및 오염물질 배출과 같은 환경부담을 줄이고, 쾌적한 환경을 조성하기 위한 목적으로 건축물의 환경 친화 정도를 평가하여 인증하는 제도이다(한국건설기술연구원, 2020).

G-SEED는 2002년에 공동주택을 대상으로 처음 도입되었으며, 최신 버전인 2016-5 version 2에 따르면 신축 건축물을 대상으로 주거용 건축물인 일반주택과 공동주택, 단독주택에 대해 녹색건축 인증을 부여하고, 비주거용 건축물인 업무용 건축물, 학교시설, 판매시설, 숙박시설, 주거복합 건축물, 일반건축물 등에 대해 인증을 부여하고 있다. 그리고 기존 건축물을 대상으로도 주거용 건축물과 비주거용 건축물에 대해 인증기준을 마련하여 인증을 부여하고 있다(국토교통부 외, 2020).

이처럼 수많은 개정을 거쳐 기준이 확대됨에 따라 2020년 12월을 기준으로 총 16,225건의 건축사업이 인증을 취득할 정도로 양적 성장을 이루고 있다(그림 2).

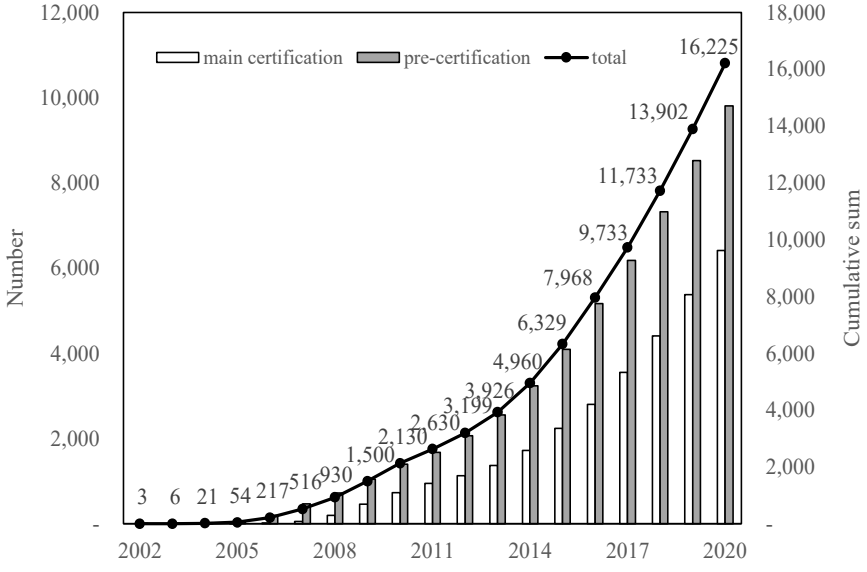


그림 2 The number of buildings that received the green building certification under G-SEED from 2002 to 2020 (건설기술연구원, 2021)

녹색건축 인증제도의 평가부문은 토지 이용 및 교통, 에너지 및 환경오염, 재료 및 자원, 물순환관리, 유지관리, 생태환경, 실내환경 등 총 7개의 전문분야로 구성되어 있다. 전문분야별 가중치를 살펴보면 표 2와 같다. 에너지 및 환경오염이 가장 큰 가중치를 보유하고 있고, 물순환 관리의 경우 모든 건축물 형태에서 10%의 가중치를 보유하고 있어 다른 분야에 비해 상대적으로 적은 편에 속한다.

표 1 The weighting distribution for different types of buildings based on the G-SEED evaluation criteria

Category		Land use and transportation	Energy and environment pollution	Material and resource	Water circulation management	Maintenance management	Ecological environment	Indoor environment
New building	Residential	10	25	18	10	7	10	20
	Non-residential	10	30	15	10	7	10	18
	House	15	25	15	10	5	10	20
Existing building	Residential	10	27	15	10	15	10	13
	Non-residential	10	25	15	10	15	10	15
Green remodeling building	Residential	-	60	10	10	10	-	10
	Non-residential	-	60	10	10	10	-	10

이 중 물순환관리 분야를 건축물별로 정리하면 표 2와 같다. 빗물 및 유출지하수 이용 인증항목의 경우 신축 건축물에서는 최대 배점이 4점이고, 기존 건축물과 그린 리모델링 건축물에서는 평가하고 있지 않다.

표 2 Credit allocation for different building types under water circulation management criteria

Category	Certification item	Credit
New building	Rainwater management	5
	Rainwater and runoff groundwater use	4
	Use of water-saving devices	3 (prerequisite)
	Water usage monitoring	2
Existing building	Water usage monitoring	2
	Operation of water conservation management guidelines	3
Green remodeling building	Use of water-saving devices	2

빗물 및 유출지하수 이용 인증항목에서는 빗물과 유출지하수 저수조와 옥상녹화시설 또는 빗물홈통의 조경녹지 연결시설 등 건축면에 발생하는 빗물이 저수조 등을 거치지 않고 조경용수 등으로 직접 이용하는 구조를 갖춘 시설의 설치를 평가하고 있으며 본 연구에서 대상으로 선정한 빗물 저수조(이하 빗물이용시설)에 관한 평점 산출기준을 정리하면 표 3과 같다.

표 3 Credit criteria for rainwater harvesting system in G-SEED

Grade	Installation of rainwater storage tank	Credit
1	Tank volume ≥ Building area(m^2) x 0.03(m)	4.0
2	Tank volume ≥ Building area(m^2) x 0.02(m)	3.2
3	Tank volume ≥ Building area(m^2) x 0.01(m)	2.4
4	Tank volume ≥ Building area(m^2) x 0.005(m)	1.6

빗물이용시설과 관련된 조건사항을 살펴보면 법정 시설의 경우 「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」에 따라 [지붕면적 (m^2) × 0.05 (m) + 5%] 이상의 빗물을 저류할 수 있는 저수조를 설치하여야 하고, 이 경우에 1급을 만족하는 것으로 판단한다. 그리고 여러 개의 동이 있는 단지 규모의 건축물에서 저수조를 일부 동에만 연결하여 빗물을 이용하는 경우에는 전체 건축면적에서 해당 건축면적에 대한 비율에 대한 용량만 인정한다. 마지막으로 빗물 저수조를 설치하여 재이용할 경우에는 초기우수배제장치와 초기 여과장치를 적용해야 한다고 명시되어 있다 (한국건설기술연구원, 2020).

제 3 절 빗물이용시설 평가항목 고찰

녹색건축 인증제도 내 빗물 및 유출지하수 이용 인증항목에서 평가하고 있는 빗물이용시설에 관한 문제점은 다음과 같다.

첫째, 신축 건축물의 경우 빗물이용시설에 관한 평가항목은 존재하지만, 단순히 빗물 저류조의 용량을 평가인자로 적용하고 있어 성능을 정량적으로 평가할 수 없다. 빗물이용시설 설계 시 고려되어야 하는 인자인 강우, 집수효율, 저류조 내 고수위와 저수위, 빗물 수요량이 고려되어 있지 않고, 빗물 저류조의 용량은 최대 건축면적(m^2) × 0.03(m)으로 제한되어 있다. 하지만 만약 강우의 특성이 고려되지 않으면 빗물이용 가능량을 알 수 없고, 집수효율이 고려되지 않는다면 빗물 손실량을 간과하게 된다. 그리고 저류조 내 고수위와 저수위를 고려하지 않으면 기후변화에 대응할 수 있는 다목적 빗물이용시설을 설계할 수 없게 되고, 제한된 빗물저류조와 빗물 사용량의 미고려는 성능이 좋은 빗물이용시설의 설치를 저해한다. 한편 기존 건축물과 리모델링 건축물에서는 빗물이용시설을 평가하고 있지 않기 때문에 설치 후에도 사용하지 않거나 리모델링 시 빗물이용시설의 설치를 고려하지 않게 된다. 이러한 평가기준의 문제점들은 녹색건축 인증제도의 취지와 달리 시설의 성능을 정량적으로 평가할 수 없다는 점에서 한계점을 지닌다.

둘째, 현재 녹색건축 인증제도에서는 빗물이용시설의 유지관리에 관한 규정이 미흡하다. 현재는 빗물의 수질 기준을 고려하지 않은 채 단순히 초기 처리장치의 설치를 의무화하고 있다. 그러나 이용 용도별로 요구되는 수질이 다르고, 기후조건이나 시설의 유지관리 상태에 따라 수질은 쉽게 변동하기 때문에 안정적인 빗물 이용을 위해서는 적절한 수질 기준에 맞춘 처리시설이 설계되어야 한다. 또한, 빗물이용시설의 성능을 유지하기 위해서는 지속적인 모니터링을 통해 빗물의 수질과 수량이 관리되어야 한다. 이러한 사항들이 지켜지지 않는다면 시설 설치 후 빗물을 이용하는 것에 대한 신뢰도가 떨어져 사용률이 낮아지게 되고, 이는 결국 시설의 성능 저하를 유발시킨다.

제 3 장 인증 대상에 따른 평가기준 제시

제 1 절 성능 평가방법 및 평가인자 선정

1.1 평가방법

빗물이용시설의 성능을 평가할 수 있는 대표적인 모델에는 미국환경청(U.S. Environmental Protection Agency; EPA)에서 제공하고 있는 SWMM(Storm Water Management Model)이 있다. SWMM은 도시유역의 하수관거 시스템에 의한 강우유출을 모의할 수 있는 모형으로서 지표면 유출에는 비선형 저류방정식을 이용한다. SWMM Ver 5.1에서는 저영향개발의 저류형 요소기술로서 빗물이용시설의 형태인 빗물통(rain barrel)이 구현되어 있다. 그러나 SWMM은 주로 유역의 물순환과 치수 및 환경적 영향을 고려한 계획과 평가를 목적으로 개발된 모형이므로 빗물의 이용과 관련된 분석 요소가 포함되어 있지 않다(Kang et al., 2015).

한편 Fewkes (1999)는 빗물 저류조 용량을 초과한 유입량이 월류된 이후에 빗물 공급량을 계산하는 방식인 YAS(yield after spillage) 방식을 이용하여 집수면적과 수요패턴이 주어졌을 때 빗물 저류조 용량을 예측할 수 있는 무차원 설계곡선을 제시하였다. Jenkins (2007)는 빗물 공급량을 먼저 계산한 후에 월류량을 고려하는 YBS(yield before spillage) 방법론을 기반으로 113년간의 일 강우 데이터와 수요량을 가지고 가정용 빗물 저류조 운영을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 개발하였다. Cowden et al., (2008)은 추계학적 기상모형인 Markov 모델과 LARS-WG를 이용하여 장기간 설계강우를 산정한 후 합리식을 이용하여 아프리카에 있는 빗물이용시설을 평가하였다. Imteaz et al., (2011)은 가정

에서의 빗물이용을 위한 일별 물 수지 모델을 제안하였다. Mun & Han (2012)는 민감도 분석을 토대로 빗물이용시설의 운영 효율을 향상시키기 위한 설계 및 평가 방법을 개발하였다. Nguyen & Han (2018)은 홍수 저감과 수자원 보존을 위한 일별 물 수지 모델인 Rainfall-Storage-Utilization-Discharge (RSUD) 모델을 제시하였다.

본 연구에서는 건축물에서의 빗물의 유입량, 공급량, 유출량 등을 계산하여 빗물이용시설의 성능을 평가하는 것을 목적으로 하고 있기 때문에 다양한 영향인자를 고려하여 빗물의 수량변동을 연속적으로 모의할 수 있는 일별 물 수지 모델을 선정하였다. 특히 Nguyen & Han (2018)에 의해 제안된 RSUD 모델은 다른 물 수지 모델과 달리 빗물 저장량과 수요량을 비교하여 정확한 공급량을 계산할 수 있다는 점에서 본 연구에 적합하다고 판단되어 평가방법으로 선정하였다.

RSUD 모델의 구조와 물의 흐름은 그림 3과 같다.

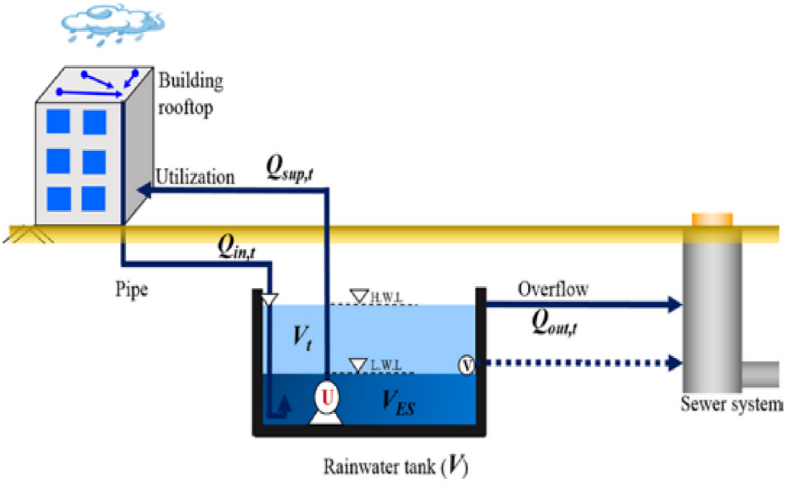


그림 3 Structure of rainwater storage tank and water flow (Han & Nguyen, 2018)

빗물 저류조 시스템 내 물의 흐름을 모의하기 위한 주요 방정식은 다음과 같다.

$$V_t = V_{t-1} + Q_{in,t} \triangle t - Q_{out,t} \triangle t - Q_{sup,t} \triangle t \quad (1)$$

V_t와 V_{t-1}은 각각 시간 t일 때와 t-1일 때의 누적 저장량(m^3)이고, $Q_{in,t}$, $Q_{sup,t}$, $Q_{out,t}$는 시간 t일 때의 유입률(m^3/day), 공급률(m^3/day), 월류율(m^3/day)이다. $Q_{sup,t}$와 $Q_{out,t}$는 다음과 같이 설명될 수 있다.

$$If \;\; V_t \leq 0, \qquad Q_{sup,t} = 0 \quad (2)$$

만약 $V_t > 0$ 이면 공급량은 누적 저장량과 유입량에 따라 달라지며 월류량은 저류조 용량에 따라 달라진다.

$$If\; V_{t-1} + Q_{in,t} \triangle t < Q_{utilization} \triangle t, \qquad Q_{sup,t} \triangle t = V_{t-1} + Q_{in,t} \triangle t \quad (3)$$

$$If\; V_{t-1} + Q_{in,t} \triangle t \geq Q_{utilization} \triangle t, \qquad Q_{sup,t} \triangle t = Q_{utilization} \quad (4)$$

$$If \;\; V_t \leq V, \qquad Q_{out,t} = 0 \quad (5)$$

$$If \;\; V_t > V, \qquad Q_{out,t} \triangle t = V_{t-1} + Q_{in,t} \triangle t - Q_{sup,t} \triangle t - V \quad (6)$$

여기서 V는 저류조 용량(m^3)이고, $Q_{utilization}$은 빗물이용량 또는 수요량(m^3/day)을 의미한다.

빗물이용시설의 성능은 위 방정식을 토대로 한 알고리즘을 이용하여 시뮬레이션에 의해 계산된다(그림 4). 본 연구에서는 Matlab R2019b를 이용하여 모의하였다.

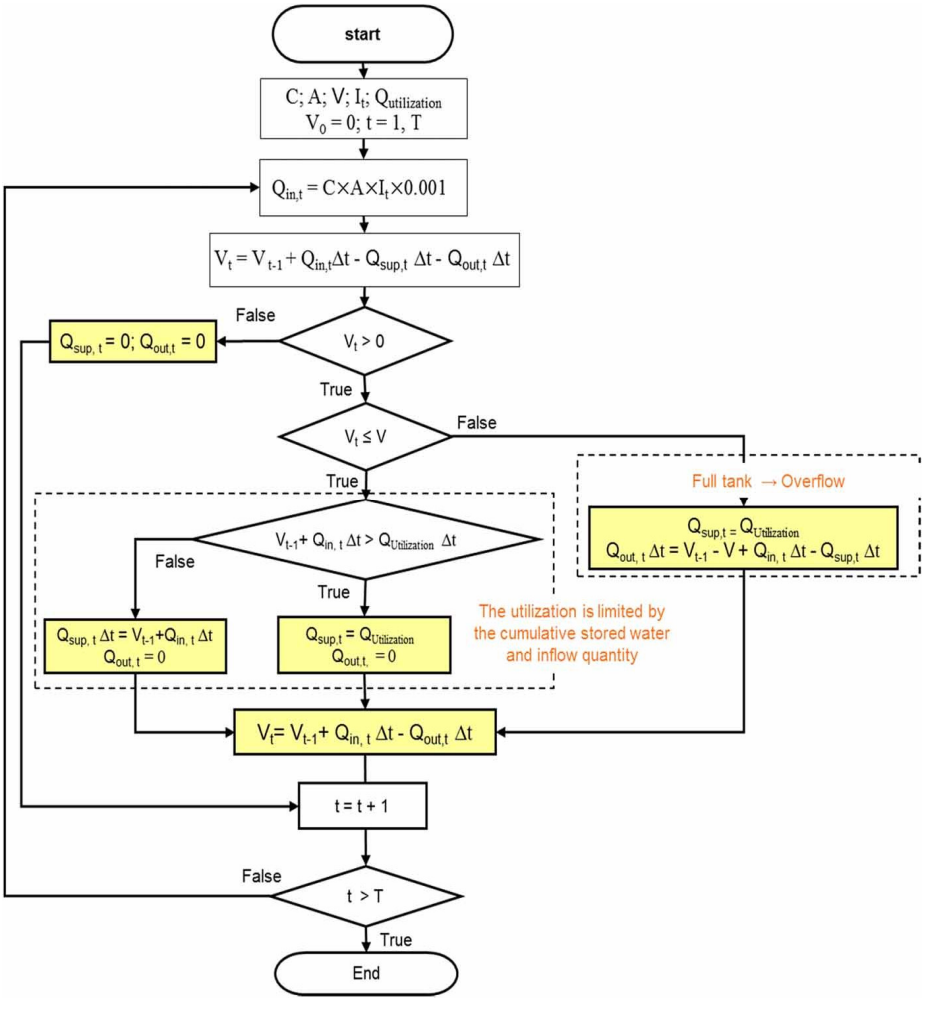


그림 4 Flow chart of RSUD model (Nguyen & Han, 2018)

1.2 평가인자

빗물이용시설의 성능을 평가하는 인자에는 대표적으로 4가지가 있다.

특정 기간에 공급된 빗물의 양을 저류조로 유입되는 빗물의 총량으로 나누는 빗물이용률(Rainwater Utilization Ratio, RUR), 총 이용량에 대한 빗물공급량의 비율을 나타내는 절수율(Water Saving Efficiency, WSE), 총 기간 중 수요량을 만족하는 기간에 대한 비율을 나타내는 신뢰도(Reliability, Re), 정해진 기간에 사용한 총 빗물의 양을 저류조 용량으로 나눈 값인 사이클 수(Cycle Number, CN)가 있다.

본 연구에서는 강우 패턴에 따른 빗물이용량을 평가할 수 있는 RUR과 과한 설계를 방지하는 WSE를 선정하였다. Re의 경우 계획된 수요량을 만족하지 못하는 일수가 많을 때 상수 보급이 제대로 이루어지지 않아 물 공급에 큰 차질이 있는 개발도상국에서 요구되는 인자이기 때문에 우리나라 기준에 적용하기에 적합하지 않고, CN은 설계 시 저류조 용량에 제한을 두어 빗물 이용을 억제하므로 제외하였다.

인자별 수식은 표 4와 같다.

표 4 Factors for evaluating the performance of rainwater harvesting system

Factor	Equation	Reference
Rainwater Utilization Ratio (RUR)	$\sum Q_{sup,t} / \sum Q_{in,t} \times 100$	Kim et al., 2014; Mwamila et al., 2016; Han & Nguyen, 2018; Bak et al., 2020;
Water Saving Efficiency (WSE)	$\sum Q_{sup,t} / \sum Q_{utilization,t} \times 100$	Fewkes et al. ,2000; Palla et al., 2011; Mun & Han, 2012; Ward et al., 2012; Steffen et al. 2013;
Reliability (Re)	$(N-U) / N \times 100$	Imteazet al., 2011; Karim et al., 2015; Zhang et al.,2018; Shokatiet al., 2019;
Cycle Number (CN)	$\sum Q_{sup,t} / V$	Mun & Han, 2012; Kim et al., 2014

여기서 N은 시뮬레이션 기간의 총 일수, U는 빗물이용시설이 수요량을 만족하지 못한 총 일수를 의미한다.

제 2 절 설계인자 도출

2.1 강우

강우는 설계 목적에 따라 다르게 적용된다. 치수를 위한 설계에서는 강우강도가 큰 경우, 즉 연 강수량이 많은 경우를 고려하고, 이수를 위해서는 연 강수량이 적은 경우를 고려한다. 따라서 치수와 이수를 모두 고려한 다목적 설계에서는 연평균 강수량을 적용할 수 있다. 그러나 우리나라의 경우 계절별 강우 편차가 크기 때문에 연평균 강수량뿐만 아니라 연간 월별 강수 분산도를 나타내는 계절성 지수(Seasonality Index, SI) (Walsh & Lawler, 1981)를 이용한 강수량 또한 추가로 고려해보았다. 장기간에 따른 계절성 지수(SI)의 수식은 다음과 같다(Bari, 2017).

$$SI_i = \frac{1}{R}\sum_{n=1}^{12}\left|X_n - \frac{R}{12}\right| \tag{7}$$

$$\overline{SI_i} = \frac{1}{j} \times \left(\sum_{j=1}^{n} SI_{ij}\right) \tag{8}$$

여기서 R은 연간 총 강수량이고, X_n은 n월의 총 강수량이며 j는 연도수에 해당한다.

두 가지 경우에 대해 대표강우를 선정하기 위하여 앞서 평가인자 중 하나인 RUR을 이용하여 모의해보았다. 서울을 대상지역으로 선정하고, 기후변화로 인해 변화하는 강우 트렌드를 반영하기 위하여 최근 10년 일강우 데이터를 활용하였다. 이때 10년 연강수량의 평균은 2018년에 해당했고, 10년 계절성 지수의 평균은 2020년에 해당하였다. 10년 강우에 대해 집수면적을 100m^2로, 수요량을 3가지 경우의 수 (0.1 m^3/d, 0.5 m^3/d,

1 m^3/d)로 가정하였고, 저류조 용량을 1-20m^3까지 설정하여 RUR을 모의해보았다. 그리고 2018년과 2020년 각각의 결과값과 나머지 9개년도의 결과값의 오차를 확인해보았다(그림 5).

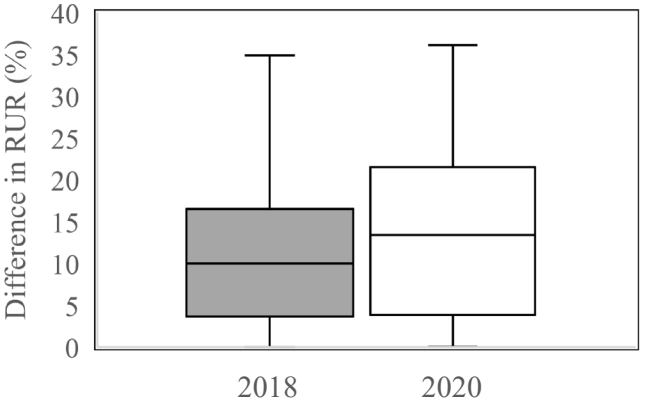


그림 5 Difference in RUR when rainfall pattern for 2018 and 2020 was selected as the representative rainfall pattern when analyzing RUR from 2011 to 2020

제안된 강우인 2018년과 2020년 강우 중 2018년이 최근 강우를 모의했을 때와 오차가 적은 것으로 보아 최근 10년 강우를 더 대표한다고 판단하였다. 이에 10년간의 연강수량의 평균값을 지닌 2018년을 대표강우로 선정하였다. 2018년의 강우량은 그림 6과 같다.

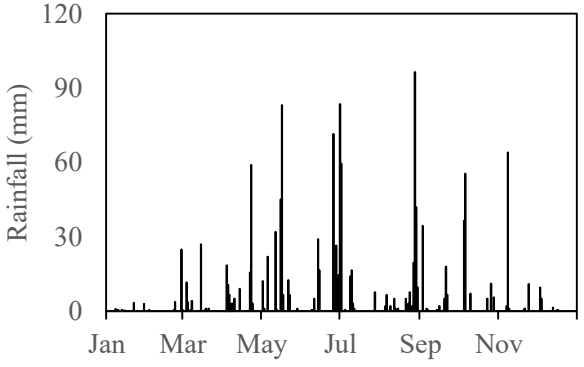


그림 6 Rainfall pattern for the year 2018

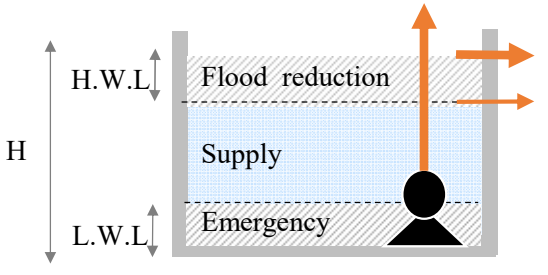
2.2 집수효율

건축물 지붕에서 빗물 저류조로 유입되면서 손실되는 수량을 고려하기 위하여 유출계수와 필터 효율 계수를 적용하였다. 지붕 유출계수의 표준값은 0.85-0.95이며(한국상하수도협회, 2013) 필터의 집수효율은 90% 이상이다(Mun & Han, 2012).

따라서 유출계수는 0.9, 필터 효율 계수는 0.9로 선정하였다.

2.3 저수위 및 고수위

빗물 저류조의 저수위 설정에 따라서는 비상용수량을, 고수위 설정에 따라서는 홍수 저감량을 결정함으로써 다목적 빗물이용시설을 설계할 수 있다(그림 7).



(H: storage height, H.W.L: high water level,
L.W.L: low water level)

그림 7 Design considerations of rainwater storage tank for multiple purpose water usage

저수위와 고수위 설정에 따른 빗물이용률의 변화를 알아보기 위해 (L.W.L+H.W.L)/H를 10 - 50%까지 각각 다른 저류조 용량과 수요량에 따라 모의해보았다(그림 8). 그 결과 (L.W.L+H.W.L)/H가 10% 증가할 때 RUR은 약 0-5%정도 감소하였고, 수요량과 저류조 용량이 작을수록 감소폭이 적은 것을 확인할 수 있었다.

따라서 이러한 결과값을 고려하여 대상지별로 설계목적에 맞춰 저수위와 고수위를 설정할 수 있다. 본 연구에서는 빗물이용시설을 다목적으로 설계할 수 있도록 20%를 기본값으로 설정하였다.

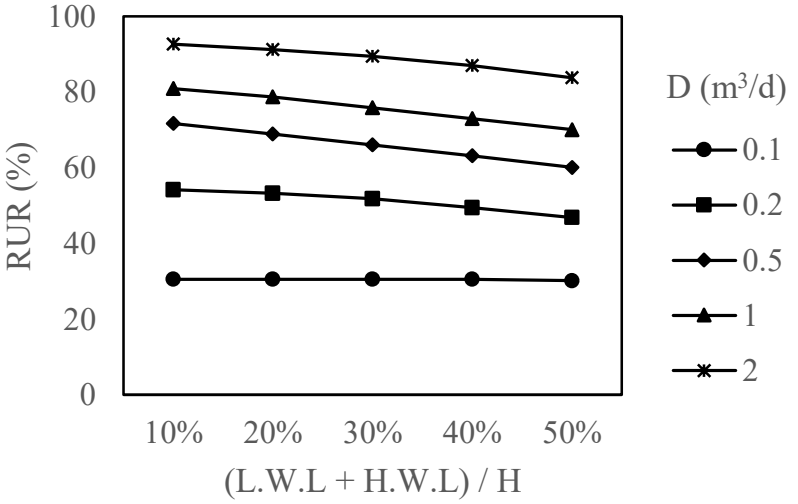


그림 8 Variation of the RUR with varying water levels under different daily water demand when a tank volume of 5 m^3

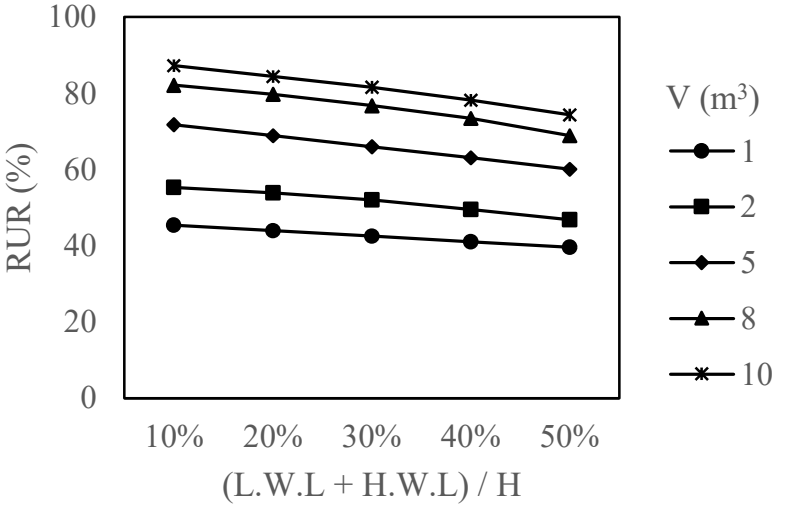


그림 9 Variation of the RUR with varying water levels under different a tank volume when daily water demand of 0.5 m^3/d

2.4 저류조 용량 및 수요량

빗물을 집수할 수 있는 면적에 따라 설계되는 저류조 용량과 수요량이 다르기 때문에 두 값을 집수면적으로 정규화하였다. 저류조 용량/집수면적(V/A)는 0.01 - 0.2 m^3/m^2 로, 수요량/집수면적(D/A)는 0.001 - 0.02 m^3/m^2d 를 모의조건으로 설정하여 앞서 선정된 평가방법과 평가인자를 활용하여 모의하였다(그림 10)(그림 11).

저류조 용량과 수요량이 증가할 때 RUR은 증가하지만, 수요량이 증가하면 WSE가 감소하였다. 이는 빗물이용률을 향상시키기 위해서는 수요량을 늘려야 하지만, 수요량의 과도한 설계는 오히려 절수율을 감소시킨다는 것을 의미한다. 그리고 저류조 용량의 경우 일정 범위를 넘어서면 RUR과 WSE 모두 거의 일정해지는 것을 확인할 수 있었다. 이 또한 저류조 용량의 과도한 설계는 오히려 효율을 낮춘다는 것을 의미한다.

그러므로 높은 효율의 빗물이용시설을 설계하기 위한 인자를 제안하기 위하여 저류조 용량/집수면적(V/A)가 0.01 증가할 때의 △RUR과 수요량/집수면적(D/A)가 0.001 증가할 때의 △WSE를 계산하였다(표5)(표6)(표7)(표8).

저장조 용량은 △RUR이 2%이하가 되기 바로 전의 V/A를 기준으로 범위를 설정하였다. 그리고 수요량의 경우 그림 9에서 D/A가 0.001일 때 RUR이 매우 낮기 때문에 D/A의 최소값을 0.002로 설정했으며 △WSE 또한 마찬가지로 2%이하가 되기 바로 전의 D/A를 기준으로 최대값을 설정하였다.

따라서 효율이 좋은 빗물이용시설의 저장조 용량의 범위는 $0.02A \leq V \leq 0.12A$, 수요량의 범위는 $0.002A \leq D \leq 0.012A$를 도출하였다.

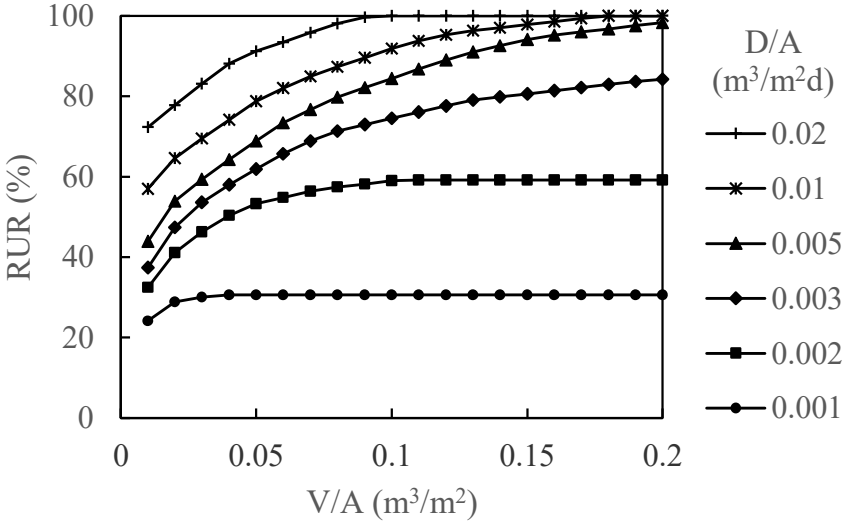


그림 10 Variation of the RUR with varying V/A ratios under different D/A ratios

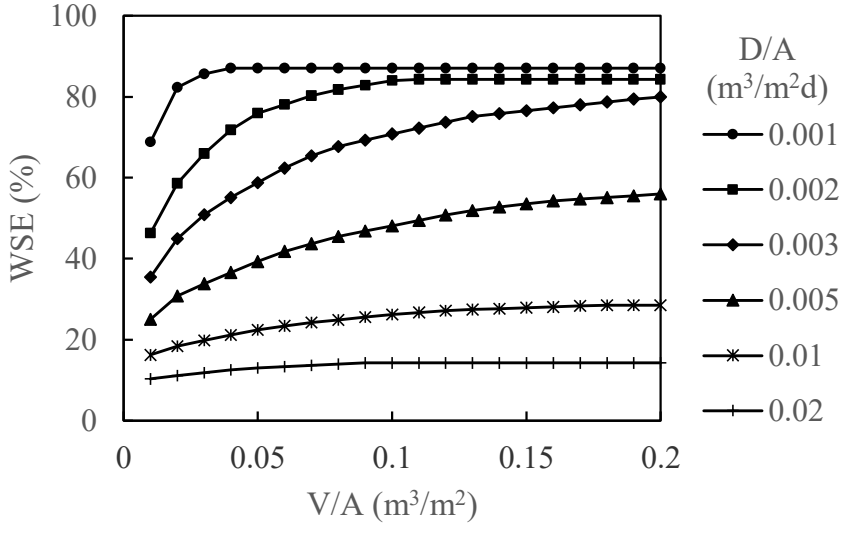


그림 11 Variation of the WSE with varying V/A ratios under different D/A ratios

표 5 Variation of RUR(%) when V/A ratio increase by 0.01

V/A	D/A									
	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.01
0.02	**4.72**	8.64	10.02	10.12	9.99	9.49	8.76	8.14	7.80	7.62
0.03	1.17	5.19	6.21	5.73	5.47	5.72	6.03	5.65	5.26	4.88
0.04	0.49	4.07	4.42	5.08	4.89	4.70	4.61	4.61	4.61	4.61
0.05	0.00	**2.89**	3.85	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61
0.06	0.00	1.54	3.85	3.95	4.50	4.41	4.15	3.86	3.58	3.29
0.07	0.00	1.54	3.16	3.08	3.30	3.11	3.08	3.08	3.08	2.93
0.08	0.00	1.05	**2.44**	3.08	3.08	2.93	2.74	2.55	2.36	2.31
0.09	0.00	0.77	1.68	2.55	2.36	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
0.1	0.00	0.77	1.54	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	**2.31**
0.11	0.00	0.20	1.54	2.31	2.31	2.31	**2.31**	**2.28**	**2.08**	1.89
0.12	0.00	0.00	1.54	**2.12**	**2.31**	**2.12**	1.70	1.54	1.54	1.54
0.13	0.00	0.00	1.47	1.54	1.95	1.54	1.54	1.54	1.25	0.96
0.14	0.00	0.00	0.77	1.54	1.54	1.54	1.12	0.77	0.77	0.77
0.15	0.00	0.00	0.77	1.54	1.54	1.12	0.77	0.77	0.77	0.77
0.16	0.00	0.00	0.77	1.54	1.12	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
0.17	0.00	0.00	0.77	1.12	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
0.18	0.00	0.00	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.68
0.19	0.00	0.00	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.58	0.00
0.2	0.00	0.00	0.53	0.77	0.77	0.77	0.77	0.48	0.00	0.00

표 6 Variation of RUR(%) when V/A ration increase by 0.01 (Continued)

V/A	D/A									
	0.011	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	0.02
0.02	7.32	6.93	6.61	6.48	6.19	5.95	5.76	5.57	5.47	5.38
0.03	4.71	4.61	4.61	4.68	5.07	5.38	5.38	5.38	5.38	5.38
0.04	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61	4.66	4.95	5.17	5.08	4.96
0.05	4.46	4.25	4.00	3.81	3.62	3.45	3.35	3.18	3.28	3.12
0.06	3.16	3.08	3.08	2.93	2.74	2.55	2.36	2.31	2.31	2.31
0.07	2.74	2.55	2.36	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
0.08	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	**2.31**	**2.31**	**2.28**
0.09	2.31	2.31	2.31	**2.31**	**2.31**	**2.28**	**2.08**	1.89	1.70	1.54
0.1	**2.31**	**2.28**	**2.08**	1.89	1.70	1.54	1.36	1.17	0.98	0.39
0.11	1.70	1.54	1.54	1.34	1.06	0.79	0.77	0.68	0.00	0.00
0.12	1.44	1.15	0.86	0.77	0.77	0.77	0.58	0.00	0.00	0.00
0.13	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00
0.14	0.77	0.77	0.77	0.77	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.15	0.77	0.77	0.77	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.16	0.77	0.77	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.17	0.77	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

표 7 Variation of WSE(%) when D/A ration increase by 0.001

V/A	D/A								
	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.01
0.01	22.55	10.80	6.44	3.99	2.77	**2.02**	1.56	1.33	1.11
0.02	23.69	13.59	8.75	5.51	3.95	2.96	**2.23**	1.76	1.41
0.03	19.65	15.09	10.57	6.47	4.35	3.23	2.68	**2.10**	1.68
0.04	15.25	16.68	11.15	7.31	4.90	3.58	2.91	**2.29**	1.83
0.05	11.13	17.15	11.52	7.96	5.34	3.89	3.15	**2.47**	1.97
0.06	8.94	15.69	12.36	8.21	5.82	4.30	3.46	2.71	**2.17**
0.07	6.74	14.88	13.17	8.52	6.22	4.52	3.62	2.83	**2.31**
0.08	5.25	14.07	13.29	8.96	6.58	4.80	3.82	3.00	**2.40**
0.09	4.15	13.57	13.07	9.43	6.83	4.95	3.94	3.09	2.47
0.1	3.05	13.20	12.88	9.76	7.05	5.11	4.06	3.18	2.54
0.11	2.77	12.03	12.70	10.09	7.27	5.27	4.19	3.33	2.66
0.12	2.77	10.57	12.65	10.29	7.58	5.58	4.33	3.39	2.71
0.13	2.77	9.17	12.95	10.27	7.96	5.68	4.41	3.54	2.83
0.14	2.77	8.44	12.59	10.49	8.10	5.96	4.59	3.57	2.86
0.15	2.77	7.71	12.22	10.71	8.45	6.18	4.63	3.60	2.88
0.16	2.77	6.98	11.86	11.16	8.72	6.23	4.67	3.63	2.91
0.17	2.77	6.25	11.79	11.53	8.80	6.28	4.71	3.66	2.93
0.18	2.77	5.52	11.97	11.64	8.87	6.33	4.75	3.70	2.98
0.19	2.77	4.78	12.15	11.75	8.94	6.39	4.79	3.79	3.17
0.2	2.77	4.28	12.11	11.86	9.01	6.44	4.93	3.96	3.17

표 8 Variation of WSE(%) when D/A ration increase by 0.001 (Continued)

V/A	D/A									
	0.011	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	0.02
0.01	0.93	0.77	0.70	0.66	0.60	0.54	0.50	0.44	0.41	0.37
0.02	1.20	1.02	0.90	0.79	0.75	0.66	0.59	0.53	0.47	0.42
0.03	1.38	1.15	0.98	0.85	0.74	0.66	0.65	0.58	0.52	0.46
0.04	1.50	1.25	1.06	0.92	0.80	0.71	0.65	0.59	0.57	0.52
0.05	1.66	1.39	1.20	1.03	0.89	0.78	0.70	0.65	0.59	0.57
0.06	1.78	1.48	1.25	1.10	0.96	0.85	0.76	0.68	0.61	0.58
0.07	1.90	1.58	1.34	1.15	1.00	0.88	0.78	0.70	0.62	0.60
0.08	1.96	1.63	1.38	1.19	1.03	0.90	0.81	0.72	0.64	0.62
0.09	**2.02**	1.68	1.43	1.22	1.06	0.94	0.87	0.77	0.69	0.66
0.1	**2.08**	1.74	1.51	1.29	1.12	0.98	0.91	0.81	0.73	0.75
0.11	**2.18**	1.82	1.54	1.36	1.19	1.04	0.92	0.83	0.83	0.75
0.12	**2.24**	1.92	1.62	1.39	1.20	1.05	0.96	0.93	0.83	0.75
0.13	**2.32**	1.93	1.64	1.40	1.21	1.11	1.05	0.93	0.83	0.75
0.14	**2.34**	1.95	1.65	1.41	1.30	1.19	1.05	0.93	0.83	0.75
0.15	**2.36**	1.97	1.66	1.52	1.36	1.19	1.05	0.93	0.83	0.75
0.16	**2.38**	1.98	1.80	1.57	1.36	1.19	1.05	0.93	0.83	0.75
0.17	2.40	**2.16**	1.83	1.57	1.36	1.19	1.05	0.93	0.83	0.75
0.18	2.59	**2.16**	1.83	1.57	1.36	1.19	1.05	0.93	0.83	0.75
0.19	2.59	**2.16**	1.83	1.57	1.36	1.19	1.05	0.93	0.83	0.75
0.2	2.59	**2.16**	1.83	1.57	1.36	1.19	1.05	0.93	0.83	0.75

제 3 절 평가기준 제시

3.1 신축 건축물을 위한 평가기준

앞서 도출한 설계인자들을 토대로 높은 효율의 빗물이용시설이 설치되도록 평가기준을 설정하였다. 최소 0.02×집수면적(A)의 저류조 용량(V)과 0.002×집수면적(A)의 수요량(D)을 지닌 빗물이용시설이 설계되도록 이때의 RUR을 최소한의 평가기준으로 설정하되, 이용에 비해 과도하게 설계되는 것을 방지하고자 최대 0.12×집수면적(A)의 저류조 용량(V)과 0.012×집수면적(A)의 수요량(D)일 때의 WSE를 전제로 하였다. 이때, RUR의 최소값은 약 41%이고, WSE는 약 23%이기 때문에 이를 반올림하여 평가기준의 범위를 RUR≥40%, WSE≥20%로 설정하였다.

따라서 신축 건축물을 위한 평가기준은 전제조건으로 RUR이 최소 40%이상이어야 하고, WSE가 최소 20%이어야 하며 빗물을 이용하는 정도, 즉 RUR의 비율에 따라 배점이 차등지급되는 형태가 되어야 한다. 그래서 RUR이 40%이고, WSE가 20%일 때, 녹색건축 인증제도 내 빗물 및 유출지하수 이용 인증항목의 최대 배점인 4점×40/100=1.6점이 최저배점이 되고 RUR이 증가할수록 높은 배점을 획득하는 형태가 된다. 예를 들어, RUR이 78%이고 WSE가 25%라면 녹색건축 인증제도 내 모든 배점은 소수점 첫째 자리까지만 존재하기 때문에 4점×78/100=3.12점을 반올림하여 3.1점을 얻게 된다.

그래서 제시된 평가기준을 적용함으로써 빗물 저류조의 설치만 고려했던 현 녹색건축 인증제도와 달리 높은 성능을 지닌 빗물이용시설의 설치를 유도할 수 있다.

3.2 기존 및 리모델링 건축물을 위한 평가기준

기존 건축물의 경우 앞서 신축 건축물과 유사한 방식으로 평가된다. 설계인자의 경우 동일하게 2018년 강우와 0.9의 유출계수 및 필터효율계수를 적용하고, 빗물 저류조 내 수위와 저류조 용량은 최초 인증 시 설계된 값을 적용한다. 그리고 수요량의 경우 모니터링을 통해 측정된 물 사용량으로 계산함으로써 실제로 빗물을 이용한 양에 대해 평가가 되어야 한다. 평가방법은 RSUD 모델로 동일하나, 평가인자는 이미 시설이 설치된 상태이기 때문에 설계 시 고려되어야 하는 WSE는 적용하지 않고, RUR로만 평가한다. 기존 건축물 평가기준은 재인증 대상 건축물을 위한 것이기 때문에 평가기준 또한 유지관리에 더 초점을 맞춰 평가되어야 한다. 그리고 성능평가 시 실제 빗물 사용량을 기준으로 평가되기 때문에 최소 1년 이상의 모니터링이 수행되어야 하며 이를 평가기준의 전제조건으로 설정해야 한다.

리모델링 건축물의 경우 이미 배관 등 모든 설비가 구축된 상태이기 때문에 신축 건축물에 적용되는 빗물이용시설을 설치하기에는 현실적으로 어려움이 많다. 또한, 문제없이 상수를 잘 이용하고 있던 건축물이라면 큰 비용을 들여 빗물이용시설을 설치하려고 하지 않을 것이다. 그러므로 현재 건축물에 추가적으로 설치하기 용이한 빗물 저금통을 평가항목으로 설정해야 하며 이때, 평가인자는 빗물 저금통의 용량이 되고, 평가기준은 녹색건축 인증제의 신축 건축물 기준을 따를 수 있다.

따라서 제시된 평가기준을 적용함으로써 빗물이용시설을 지속적으로 운영하고, 기존 건축물에 빗물이용시설의 설치를 확산시킬 수 있을 것이다.

제 4 장 평가기준 적용에 따른 성능 분석

제 1 절 온실가스 배출 원단위 산출

빗물 이용에 따른 온실가스 감축 효과를 정량적으로 평가하기 위하여 온실가스 배출 원단위를 산출하였다.

수도 사업에서 연간 에너지 사용량 중 전력이 차지하는 비중은 전체의 99.4%이기 때문에 상수도 부문의 온실가스 배출량은 전력사용량을 적용할 수 있다(산업통상자원부, 2018). 이때 전력사용량은 취수, 정수, 배수과정에서 소비되는 모든 전력량을 고려해야 한다. 여기에 전력 배출계수 0.446 $kgCO_2eq/kWh$를 적용함으로써 물 $1m^3$ 생산 시 배출되는 온실가스 배출량, 즉 빗물을 이용함으로써 감축되는 온실가스 배출량을 간접적으로 산정할 수 있다(한국환경공단, 2017).

$$Greenhouse\ gas\ intensity\ (kgCO_2eq/m^3) = \frac{Total\ electrical\ power\ usage}{Water\ supply}(kWh/m^3) \times 0.466\ kgCO_2eq/kWh \quad (9)$$

최근 10년간(2010~2019)의 상수도통계를 이용하여 온실가스 배출 원단위를 산출하였다(그림 12). 연도별로 온실가스 배출 원단위가 상이하기 때문에 본 연구에서는 대표성을 위하여 최근 10년간 온실가스 배출 원단위의 평균값을 이용하였다.

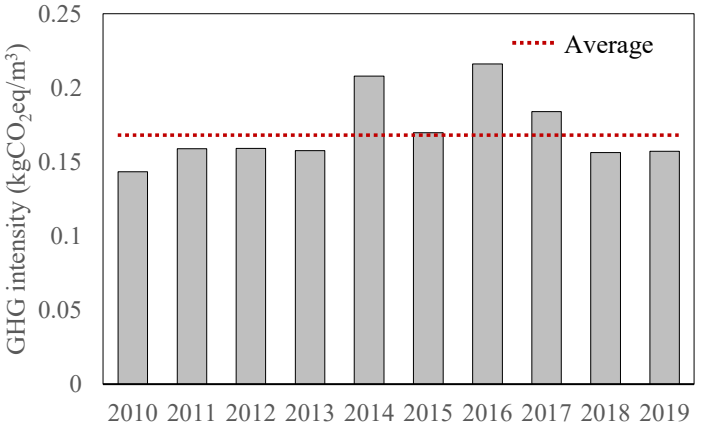
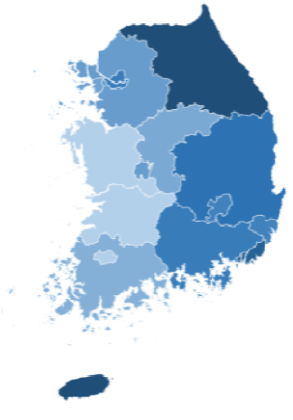


그림 12 Annual greenhouse gas (GHG) intensity

그리고 지형적 특성을 반영하기 위하여 지역별 온실가스 배출 원단위를 산출하였다(그림 13). 다른 지역에 비해 제주도 권역은 온실가스 배출량이 많은 것으로 분석되었는데, 이는 대부분 생활용수를 지하수로부터 공급받기 때문에 타 취수시설보다 단위 취수량당 전력 사용량이 많아 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단되었다.



($kgCO_2eq/m^3$)

Seoul 0.19	**Gyeonggi** 0.14
Busan 0.30	**Gangwon** 0.40
Incheon 0.13	**Chungbuk** 0.12
Daejeon 0.14	**Chungnam** 0.06
Daegu 0.18	**Gyeongbuk** 0.21
Ulsan 0.18	**Gyeongnam** 0.19
Gwangju 0.06	**Jeonbuk** 0.06
Sejong 0.08	**Jeonnam** 0.11
	Jeju 0.56

그림 13 The average regional GHG intensity considering a period of 10 years

제 2 절 평가기준 적용에 따른 비교

신축 건축물에 빗물이용시설을 설치하였을 경우 얻을 수 있는 환경성능을 추측하기 위하여 가상의 건물을 토대로 앞서 제시한 평가방법을 적용해보았다.

서울 지역에 A의 집수면적을 지닌 빗물이용시설을 설치한다고 가정하고, RUR이 약 10%씩 증가할 때, 구간별로 얻을 수 있는 빗물이용량과 온실가스 감축량을 산출하였다(표 9). 이때, 온실가스 감축량은 앞서 구한 서울 지역의 원단위인 0.19kgCO_2eq/m^3를 적용하였다. 그 결과, RUR이 10% 상승할 때, 빗물이용량은 약 0.1×집수면적(A) m^3/yr, 온실가스 감축량은 약 0.02×집수면적(A) kgCO_2eq/yr만큼 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 500m^2의 집수면적을 지닌 건축물에 60%의 RUR을 지닌 빗물이용시설을 설계할 경우 1년에 약 310m^3의 빗물을 이용하고, 약 60kgCO2eq의 온실가스를 감축할 수 있음을 의미한다.

마찬가지로 다른 지역에 대한 빗물 이용에 따른 온실가스 감축 효과도 앞서 산출한 지역별 온실가스 배출 원단위를 이용하여 구할 수 있다.

표 9 GHG reduction and rainwater utilization in accordance with RUR range under the proposed evaluation system

RUR range	Rainwater utilization (m^3/yr)	GHG reduction ($kgCO_2eq$/yr)
100%	1.04A	0.20A
≥ 90%	≥ 0.94A	≥ 0.18A
≥ 80%	≥ 0.83A	≥ 0.16A
≥ 70%	≥ 0.73A	≥ 0.14A
≥ 60%	≥ 0.62A	≥ 0.12A
≥ 50%	≥ 0.52A	≥ 0.10A
≥ 40%	≥ 0.42A	≥ 0.08A

그리고 현 녹색건축 인증제도에서 평가하고 있는 기준과 제시된 평가기준 적용에 따른 결과를 비교하기 위하여 기존에 설치되어 있는 빗물이용시설을 대상으로 각각의 기준을 적용해보았다.

대상시설은 2019 하수도통계와 지자체별 빗물이용시설 현황을 참고하였고, 시설의 성능평가를 위하여 빗물 사용량이 모니터링되고 있고, 저류조 용량과 집수면적에 대한 정보를 알 수 있으며 빗물이용률(RUR)이 40% 이상인 시설 40곳을 선정하였다. 빗물이용시설의 위치 및 개소수는 그림 14와 같고, 시설별 특징은 그림 15와 같다.

그림 14 The number of rainwater harvesting systems based on the location

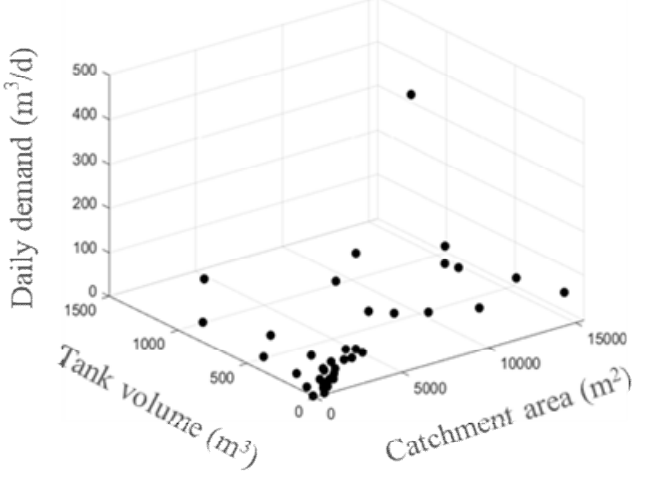


그림 15 Features of the existing rainwater harvesting systems

선정된 빗물이용시설을 대상으로 녹색건축 인증제도의 평가기준과 제시된 평가 기준을 각각 적용하였다(그림 16)(그림 17). 제시된 평가 기준을 적용하여 온실가스 배출 저감량을 계산할 때에는 각 시설이 위치한 지역의 온실가스 배출 원단위를 적용하였다.

그 결과, 녹색건축 인증제도의 기준을 적용했을 때는 빗물 저류조의 용량만으로 평가되기 때문에 실제 성능에 대한 검증 없이 배점이 과도하게 부여되어 대부분의 빗물이용시설이 4점을 받을 수 있었다. 이에 비해 제시된 평가 기준은 빗물 이용량과 이에 따른 온실가스 감축량을 정량적으로 산출할 수 있었으며 그 결과 시설의 성능에 따라 변별력있게 배점을 부여할 수 있었다.

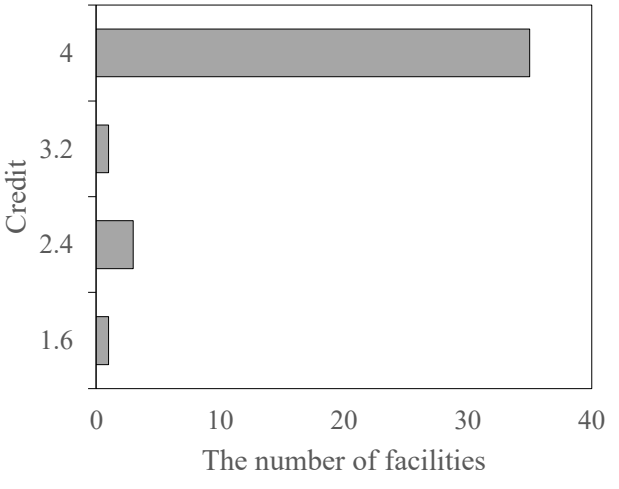


그림 16 When the evaluation criteria of G-SEED was applied to existing rainwater harvesting systems

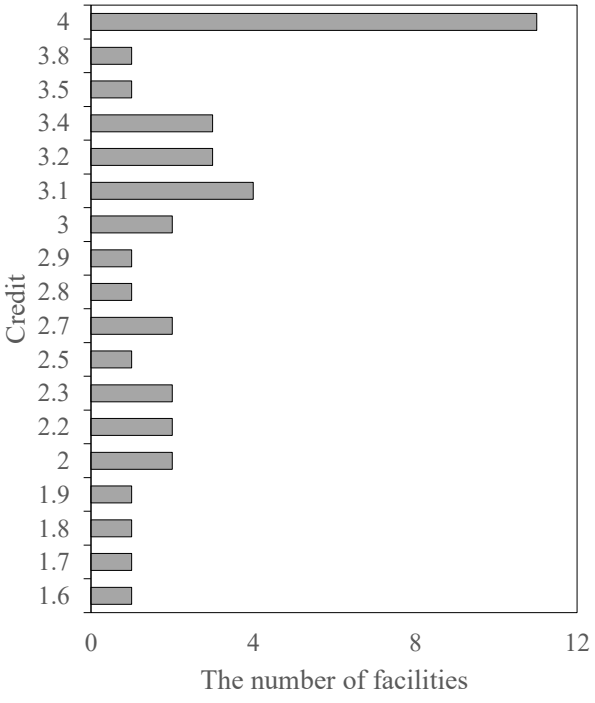


그림 17 When the proposed evaluation criteria was applied to existing rainwater harvesting systems

따라서 녹색건축 인증제도의 평가기준은 성능을 고려하지 않는 빗물이용시설의 설치를 야기할 수 있기 때문에 제시된 평가 기준을 적용하여 효과에 대한 정량적인 평가를 토대로 성능에 따라 배점이 부여되어야 한다.

제 5 장 성능 유지를 위한 가이드라인 제시

제 1 절 처리시설 설계 가이드라인

현 녹색건축 인증제도는 수질 기준에 대한 고려 없이 초기 처리장치만 설치하게끔 규정되어 있다. 그러나 빗물이용시설을 지속적이고 안정적으로 사용하기 위해서는 빗물의 수질 기준을 토대로 한 처리시설이 설치되어야 한다. 이에 수질 기준에 적합한 처리시설 설계 가이드라인을 제시하고자 한다.

현재까지 빗물의 수질기준을 법적으로 규정하고 있는 국가는 없으며 대부분 수질권고기준을 참고하여 빗물이용시설을 설계하고 있다. 각국의 빗물 수질권고기준을 정리하면 표 10, 표 11과 같다. 한국의 물 재이용시설 가이드라인에서는 pH와 Turbidity만 고려하고 있다(한국상하수도협회, 2013). 미국에서는 화장실 용수와 같은 비음용 실내용수에 한해서 Total coliforms와 Fecal coliforms를 규정하고 있으며 조경용수 등 실외 사용에는 기준이 설정되어 있지 않다(EPA, 2008). 영국은 용도별로 pH, Turbidity, DO, Colour, Total coliforms, E.Coli, Intestinal enterococci, Legionella pneumophila, Residual chlorine, Residual bromine을 수질항목으로 고려하고 있다(BSI, 2009). 호주에서는 Turbidity와 E.Coli만 고려하고 있다(Natural Resource Management Ministerial Council et al., 2006).

빗물 이용 측면에서 모든 수질 기준의 항목을 만족하는 것은 비효율적이기 때문에 빗물의 수질 권고기준 중에서 적어도 2개 이상 중복되는 수질 항목을 필수항목으로 고려하였다. 그 결과 pH, Turbidity, Total coliforms, E.Coli가 선정되었다.

표 10 Rainwater quality standards

Country	Korea	USA		UK			Australia	
Use	-	Non-portable indoor uses	Outdoor uses	Toilet	Irrigation	Spray application	Toilet	Pressure washing, irrigation
pH	**5.8-8.5**	N/A	N/A	**5-9.5**	**5-9.5**	**5-9.5**	N/A	N/A
Turbidity (NTU)	**≤ 5**	N/A	N/A	**<10**	**<10**	**<10**	**<2**	**<25**
BOD (mg/L)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
DO (mg/L O_2)	N/A	N/A	N/A	>1	>1	>1	N/A	N/A
Colour (TCU)	N/A	N/A	N/A	acceptable	acceptable	acceptable	N/A	N/A
Total coliforms (MPN /100ml)	N/A	**<500**	N/A	**1000**	**1000**	**10**	N/A	N/A
E.Coli (MPN /100ml)	N/A	N/A	N/A	**250**	**250**	**0**	**<1**	**<10**

표 11 Rainwater quality standards (Continued)

Country	Korea	USA		UK			Australia	
Use	-	Non-portable indoor uses	Outdoor uses	Toilet	Irrigation	Spray application	Toilet	Pressure washing, irrigation
Fecal coliforms (MPN /100ml)	N/A	<100	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Intestinal enterococci (mg/L)	N/A	N/A	N/A	100	100	0	N/A	N/A
Legionella pneumophila (mg/L)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	10	N/A	N/A
Residual chlorine (mg/L)	N/A	N/A	N/A	<2	<0.5	<2	N/A	N/A
Residual bromine (mg/L)	N/A	N/A	N/A	<2	<2	<2	N/A	N/A
Odor	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cl^- (mgCl/L)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

앞서 선정된 수질항목을 고려했을 때, 초기 처리장치가 설치된 국내 빗물이용시설의 수질검사결과는 표 12와 같다.

표 12 The water quality parameters observed for rainwater harvesting systems installed in Korea

	pH	Turbidity (NTU)	Total coliforms (MPN/100ml)	E.coli (MPN/100ml)
(Kim et al., 2005)	6.6-8.3	1-12	200-2300	0-8
(Han & Mun, 2007)	6.8-8.4	1.3-2.4		
(Kim & Han, 2011)	6.7±0.06	5.4±0.02		
(Lee et al., 2012)	6-7.9		1-12	0-2
(Kim et al., 2014)	6.8-7.4	0.42-0.64		
(Lee et al., 2016)	6.1-8.4	1.4-15.5	120-240	35-74

선정된 빗물 수질기준과 국내 빗물이용시설의 저류조 내 빗물 수질을 비교해본 결과, Turbidity, Total coliforms, E.Coli 항목은 사이트에 따라 초기 처리장치를 설치해도 수질기준에 만족하지 않는 경우도 있는 것을 확인할 수 있다(표 13). 이는 무강우 일수나 황사와 같은 기상조건이나 시설의 유지관리 상태에 따라 수질이 변동함으로써 기준에 만족하지 못하는 것으로 사료된다.

표 13 Required water quality levels for different uses in different countries and the measured rainwater quality parameters in Korea

Country	Korea	USA	UK			Australia		Measured range of stored rainwater
Use	-	Non-portable indoor uses	Toilet	Irrigation	Pressure washing	Toilet	Pressure washing, irrigation	
pH	5.8-8.5	N/A	5-9.5	5-9.5	5-9.5	N/A	N/A	6-8.4
Turbidity (NTU)	≤ 5	N/A	< 10	< 10	< 10	< 2	< 25	0.42 - 15.5
Total coliforms (MPN/ 100ml)	N/A	<500	1000	1000	10	N/A	N/A	1-2300
E.Coli (MPN/ 100ml)	N/A	N/A	250	250	0	< 1	< 10	0-74

따라서 빗물 수질기준에 적합한 처리시설의 설계가 요구된다. 그러나 추가적인 설치에 대한 부담이 생길 수 있으므로 설치 비용이 상대적으로 적게 들고, 설계 및 유지관리가 용이한 처리시설을 가이드라인으로 제안하고자 한다.

이러한 관점에서 입자성 오염물질은 빗물 저류조 설계를 통해 쉽게 제거할 수 있다. J 타입의 유입구는 하단 침전물의 재부상을 억제하고, 중간 월류턱은 높은 입자 포집율로 침전물이 저류조 전체에 확산되는 것을 막아 유출 수질을 향상시킨다(Ryu, 2009; Won et al., 2019)(그림 18).

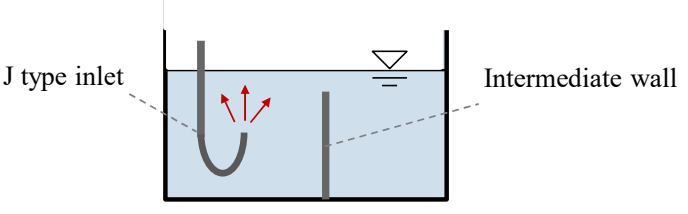


그림 18 Design of the storage tank

Magyar & Ladson (2011)은 원추형 모양의 빗물 저류조가 슬러지 배수에 용이하며 이를 통해 침전물의 두께를 낮은 수준으로 유지할 수 있다고 하였으며 호주의 빗물이용시설 설계 가이드라인에서는 빗물 공급수에 입자가 포함되는 것을 최소화하기 위하여 유출구 높이를 최소 50mm 이상으로 설치할 것을 권장하고 있다(Australian Government, 2008).

한편 Total Coliforms과 E.Coli와 같은 미생물 제거를 위해서는 수중의 오염물질과 박테리아를 제거하는 자연 여과제인 바이오필름을 고려할 수 있다(Kim & Han, 2011). 이때, 빗물 저류조 내부에 Baffle 등을 이용하여 비표면적을 증가시킴으로써 바이오필름의 효과를 극대화시킬 수 있다(Kim & Han, 2014; Kim et al., 2016). 또한 UV 소독과 같은 간단한 처리도 미생물을 제거하는 데에 사용될 수 있다(Lee et al. 2017).

베트남 Cukhe에 설치된 빗물이용시설은 초기처리장치외에 저류조 내에 J 타입 유입구를 설치하고, UV 필터를 적용함으로써 안정적인 수질을 유지하고 있다. 표 14는 해당 빗물이용시설의 수질 검사 결과이다

(Dao et al., 2017). 빗물의 수질 권고기준 중 가장 엄격한 기준을 적용해도 모든 항목이 만족하는 것을 확인할 수 있다.

표 14 Results of rainwater quality tests (S1: stored rainwater, S2: treated rainwater)

Parameters	Stringent water quality standard	S1	S2
pH	5.8 - 8.5	6.3-7.9	6.36-7.24
Turbidity (NTU)	< 2	0.05-1.2	0.6
Total coliforms (MPN/100ml)	Toilet: <500 Pressure washing: 10, Irrigation: 1000	0-78,000	0
E.Coli (MPN/100ml)	Toilet: < 1, Pressure washing: <10 Irrigation: < 10	0-3,200	0

앞서 용도별 빗물 수질 권고기준에 따르면 영국의 수질 기준을 제외하고, 대체로 화장실 용수로 공급하는 경우 다른 용도에 비해 엄격한 기준이 적용되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 빗물이용시설 설계 시 상대적으로 높은 수질을 요구하는 화장실 용수로 공급하는 경우에만 추가 처리장치를 설치하는 규정을 제안한다.

그래서 기존의 녹색건축 인증제도는 외부적 요인으로 인해 수질 기준에 만족하지 못하는 경우가 발생했다면, 해당 가이드라인을 규정으로 적용함으로써 수질을 안정적으로 유지하여 시설의 성능을 지속시킬 수 있을 것이다.

제 2 절 수질 및 수량 모니터링 가이드라인

현재 녹색건축 인증제도에는 모니터링 관련 규정이 없어 사후관리가 되고 있지 않으며 이는 빗물이용시설의 사용률을 떨어뜨리는 요인으로 작용하고 있다. 이에 앞서 논의된 빗물 수질 기준과 관련된 항목을 중심으로 수질 및 수량 모니터링 주기와 샘플링 위치에 관한 가이드라인을 제안하고자 한다. 모니터링 규정이 너무 복잡하고 번거로울 경우 참여율이 낮을 수 있기 때문에 관리자의 편의성과 모니터링의 용이성을 고려하여 최소한의 이행으로 빗물이용시설의 성능을 유지하고자 한다. 그림 19는 빗물이용시설에서 모니터링을 이행해야 하는 위치이며 표 15는 수질과 수량에 따른 항목별 검사 주기와 해당 위치를 나타낸다. 해당 가이드라인은 빗물을 의료시설의 식수로 이용하고 있어 안정적인 수질과 수량의 유지가 필수적으로 요구되는 Ly Nhan 보건소의 빗물이용시설 모니터링 가이드라인을 참고하였다.

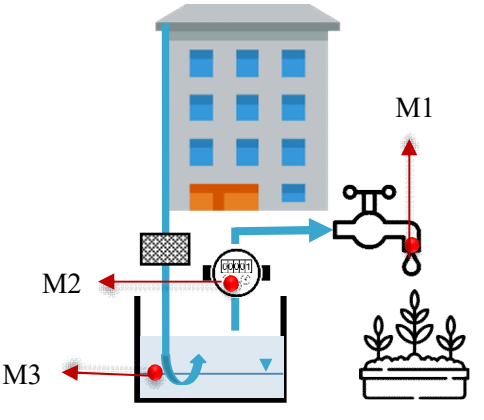


그림 19 Proposed water sampling points in rainwater harvesting systems for monitoring

표 15 Proposed monitoring schedule

Category	Monitoring item	Interval	Point
Water quality	pH	Quarterly	M1
	Turbidity		
	Total coliforms		
	E.coli		
Water quantity	Cumulative water consumption	Monthly	M2
	Water level		M3

그래서 제안된 수질과 수량 모니터링 가이드라인을 앞서 기존 건축물을 위한 평가의 기반자료로 사용하고자 한다. 최소 1년간의 모니터링 의무규정을 만들어 이를 토대로 성능과 유지관리 여부를 평가하여 시설이 지속적으로 사용될 수 있게끔 해야 한다.

이 외에도 모니터링 활성화를 위하여 다양한 방안들이 강구될 수 있다. 먼저, 장기간 이행 시 인센티브를 제공하거나 인증 수수료를 일부 환급하는 방안이 있다. 현재 녹색건축 인증을 취득한 건축물에 대해서는 건축주에 한해서만 인센티브를 제공하고 있어 설치 후 빗물이용시설을 지속적으로 운영함에 따른 혜택이 부족한 실정이다. 따라서 인증 건축물의 실 사용자에게 인센티브를 제공하여 시설의 운영과 유지관리에 대한 동기부여가 이루어져야 한다.

두 번째로는 통합유지관리 시스템을 구축하여 오프라인 운영 시 소요되는 비용을 감축하는 방안이 있다. 만약 인증기관이나 민간기업이 일정기간 단위로 사후점검이나 실태조사를 실시할 경우, 이때 발생하는 인건비는 시설의 유지관리를 평가하는 데에 큰 어려움이 될 수 있다. 하지만, 통합유지관리 시스템을 구축하면 사용자도 시설의 운영데이터를

관리하기 용이하고, 현장조사에 따른 비용 또한 절감할 수 있다.

현 녹색건축 인증제도는 빗물이용시설 설치 후 유지관리가 미흡하여 성능이 저하되고, 사용률이 낮았다. 하지만 제안된 빗물이용시설의 수질 및 수량 모니터링에 관한 규정을 적용함으로써 시설의 성능을 유지하고, 조사된 데이터를 토대로 시설의 현황 파악 및 녹색 건축물의 성능 증명을 위한 기초자료로 사용할 수 있을 것이다.

제 6 장 결 론

본 연구에서는 현 녹색건축 인증제도의 빗물 및 유출지하수 이용 인증항목 내에서 평가되고 있는 빗물이용시설의 문제점에 대해 고찰하고, 이를 개선하기 위한 평가 기준과 설계 및 유지관리 기준을 제시하였다. 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 인증 대상에 따른 평가기준 제시

녹색건축 인증제도의 빗물이용시설 평가항목은 신축 건축물에 한하여 빗물 저류조의 용량만으로 평가하고 있고, 설계인자가 고려되고 있지 않아 시설의 성능을 정량적으로 평가할 수 없다는 한계점을 지닌다. 이를 개선하기 위하여 신축, 기존, 리모델링 건축물을 위한 평가기준을 제시하였다.

먼저, 빗물이용시설의 성능을 평가하기 위한 방법으로 RSUD 모델을, 평가인자로는 RUR과 WSE를 선정하였다. 그리고 설계인자로는 강우, 집수효율, 저류조 내 저수위 및 고수위, 저류조 용량, 수요량을 고려하였고, 이를 토대로 평가기준을 제시하였다. 과도한 설계를 방지하기 위하여 일정 비율의 WSE를 전제로 하고, 빗물을 이용하는 정도, 즉 RUR에 따라 배점을 받을 수 있는 평가기준을 제시하였다. 기존 건축물의 경우 신축 건축물의 평가기준과 유사하지만, 수요량 대신 1년간의 모니터링을 토대로 실제로 측정된 빗물 사용량을 적용함으로써 빗물이용시설의 실제 성능과 운영을 평가할 수 있게끔 제안하였다. 리모델링 건축물의 경우 모든 설비가 구축된 상태로, 신축 건축물에 적용되는 빗물이용시설을 설치하기에는 현실적으로 어려움이 많기 때문에 기존 건축물에 추가적으로 설치하기 용이한 빗물 저금통의 설치를 고려한 평가기준을 제안하였다. 이러한 평가기준들은 높은 성능을 지닌 빗물이용시설의 설치를 유도하고, 기존 건축물에 빗물이용시설을 확산시킬 수 있을 것이다.

2. 평가기준 적용에 따른 성능 분석

온실가스 배출량 감축을 통해 기후변화에 대응하기 위한 국가적 정책에 기반하여 빗물 이용에 따른 온실가스 감축 효과 측면에서 분석을 시행하였다. 이를 위해 연도별, 지역별 온실가스 배출 원단위를 산출하였고, 가정을 토대로 빗물이용시설을 설계했을 때의 빗물 이용 효과와 이에 따른 온실가스 감축 효과를 분석하였다. 또한, 현재 설치되어 있는 빗물이용시설을 대상으로 녹색건축 인증제도의 평가기준을 적용한 경우와 제시된 평가기준을 적용한 경우를 비교하였다. 그 결과 성능에 대한 검증없이 높은 등급을 부여하는 녹색건축 인증제도와 달리, 제시된 평가기준은 빗물 이용에 따른 온실가스 감축 효과를 정량적으로 산출할 수 있었고, 그 결과 시설의 성능에 따라 변별력있게 배점을 부여할 수 있었다.

3. 성능 유지를 위한 가이드라인 제시

녹색건축 인증제도에서는 빗물이용시설 설계 시 수질기준을 고려하지 않은 처리시설을 설치하도록 규정하고 있고, 유지관리에 관해서는 별도의 규정이 없다. 그러나 국가별 빗물 권고 수질기준을 토대로 우리나라의 빗물 수질을 검토한 결과 기상조건이나 유지관리 상태에 따라 수질이 변동함으로써 기준에 만족하지 못하는 경우도 있었다. 이에 빗물이용시설 설계 시 상대적으로 높은 수질을 요구하는 화장실 용수 공급에 한하여 입자성 오염물질과 미생물 제거를 위한 빗물 저류조의 설계방안과 바이오필름 등을 제시하였다. 그리고 앞서 논의된 빗물 수질 기준과 관련된 항목을 중심으로 빗물의 수질 및 수량 모니터링 주기와 샘플링 위치에 관한 가이드라인을 제시하였다. 새로운 규정을 적용함으로써 빗물의 수질과 성능을 안정적으로 유지할 수 있고, 이를 통해 축적된 데이터는 시설의 현황 파악과 녹색 건축물의 성능 증명을 위한 기초자료로 사용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

Australian Government. (2008). Rainwater Tank Design and Installation Handbook.

Bak, G., Dao, A. D., & Han, M. (2020). Improving the hydrological performance of a rainwater for drinking (RFD) system at a rural hospital in Vietnam. Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development, 10(4), 916-926. https://doi.org/10.2166/washdev.2020.104

Bari, S. H., Hussain, M. M., & Husna, N.-E. A. (2016). Rainfall variability and seasonality in northern Bangladesh. Theoretical and Applied Climatology, 129(3-4), 995-1001. https://doi.org/10.1007/s00704-016-1823-9

BSI. (2009). Rainwater harvesting systems - Code of practice

Cowden, J. R., Watkins, D. W., & Mihelcic, J. R. (2008). Stochastic rainfall modeling in West Africa: Parsimonious approaches for domestic rainwater harvesting assessment. Journal of Hydrology, 361(1-2), 64-77. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.025

EPA. (2008). Managing Wet Weather with Green Infrastructure Municipal Handbook.

Fewkes, A. (1999). The use of rainwater for WC flushing: the field testing of a collection system. Building and Environment, 34(6), 765-772. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-1323(98)00063-8

Han, M., & Nguyen, D. C. (2018). Rainfall-Storage-Utilization-Discharge model for flood mitigation and water conservation. Water Supply, 18(4), 1252-1260. https://doi.org/10.2166/ws.2017.184

Han, M. Y., & Mun, J. S. (2007). Particle behaviour consideration to maximize the settling capacity of rainwater storage tanks. Water Science & Technology, 56(11), 73-79. https://doi.org/10.2166/wst.2007.778

Ryu H. G. (2009). The Effects on Design Factors for Water Quality and Management in A Rainwater Storage Tank (Master's thesis). Seoul National University. Seoul, Korea.

Hyun, E.-M., An, K.-H., & Kim, Y.-S. (2017). A Fundamental Study on the Revision Direction of G-SEED for Green Remodeling Building. KIEAE Journal, 17(3), 51-58. https://doi.org/10.12813/kieae.2017.17.3.051

Imteaz, M. A., Ahsan, A., Naser, J., & Rahman, A. (2011). Reliability analysis of rainwater tanks in Melbourne using daily water balance model. Resources, Conservation and Recycling, 56(1), 80-86. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.008

Jenkins, G. A. (2007). Use of continuous simulation for the selection of an appropriate urban rainwater tank. Australasian Journal of Water Resources, 11(2), 231-246. https://doi.org/10.1080/13241583.2007.11465327

Kang, T., Koo, Y., & Lee, S. (2015). A Study on Design Method and Effect Analysis of Rainwater Harvesting Facility for Efficient Use. Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 15(2), 353-361. https://doi.org/10.9798/kosham.2015.15.2.353

Karim, M. R., Bashar, M. Z. I., & Imteaz, M. A. (2015). Reliability and economic analysis of urban rainwater harvesting in a megacity in Bangladesh. Resources, Conservation and Recycling, 104, 61-67. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.010

Kim, K., Park, H., Kim, T., & Han, M. (2014). Evaluation of Stored

Rainwater Quality and Economic Efficiency at Yangdo Elementary Rainwater Harvesting System. Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 36(5), 333-341. https://doi.org/10.4491/ksee.2014.36.5.333

Kim, M., Bak, G., & Han, M. (2011). Comparing the microbial characteristics of rainwater in two operating rainwater tanks with different surface-to-volume ratios. Water Sci Technol, 64(3), 627-631. https://doi.org/10.2166/wst.2011.626

Kim, M., & Han, M. (2011). Composition and distribution of bacteria in an operating rainwater harvesting tank. Water Sci Technol, 63(7), 1524-1530. https://doi.org/10.2166/wst.2011.410

Kim, M., & Han, M. (2014). Characteristics of biofilm development in an operating rainwater storage tank. Environmental Earth Sciences, 72(5), 1633-1642. https://doi.org/10.1007/s12665-014-3067-2

Kim, M., Park, H., Han, M., & Kim, T. (2016). Impact of Biofilms on Rainwater Quality Improvement in Tank. Journal of Korean Society of Water Science and Technology, 24(1), 47-55. https://doi.org/10.17640/kswst.2016.24.1.47

Kim, M., Park, H., Han, M., & Won, Y. (2019). Optimal rainwater tank design for control of particulate contaminants. Water Supply, 19(2), 574-579. https://doi.org/10.2166/ws.2018.103

Kim, R. H., Lee, S., Kim, Y. M., Lee, J. H., Kim, S. K., & Kim, S. G. (2005). Pollutants in rainwater runoff in Korea: their impacts on rainwater utilization. Environ Technol, 26(4), 411-420. https://doi.org/10.1080/09593332608618546

Kim, T. (2018). Analysis of Greenhouse Gas Emissions in Korea's Building Sector. Ministry of Environment, Korea Environmental Industry & Technology Institute

Walsh R. P. D. & Lawler D. M. (1981). RAINFALL SEASONALITY: DESCRIPTION, SPATIAL PATTERNS AND CHANGE THROUGH TIME. Weather, 36(7), 201-208.

Lee, J. Y., Bak, G., & Han, M. (2012). Quality of roof-harvested rainwater--comparison of different roofing materials. Environ Pollut, 162, 422-429. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.005

Lee, M., Kim, M., Kim, Y., & Han, M. (2017). Consideration of rainwater quality parameters for drinking purposes: A case study in rural Vietnam. J Environ Manage, 200, 400-406. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.072

Magyar, M. I., Ladson, A. R., Mitchell, V. G., & Diaper, C. (2015). The Effect of Rainwater Tank Design on Sediment Re-Suspension and Subsequent Outlet Water Quality. Australasian Journal of Water Resources, 15(1), 71-84. https://doi.org/10.1080/13241583.2011.11465391

Mun, J. S., & Han, M. Y. (2012). Design and operational parameters of a rooftop rainwater harvesting system: definition, sensitivity and verification. J Environ Manage, 93(1), 147-153. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.08.024

Mwamila, T. B., Han, M. Y., Ndomba, P. M., & Katambara, Z. (2016). Performance evaluation of rainwater harvesting system and strategy for dry season challenge. Water Practice and Technology, 11(4), 829-837. https://doi.org/10.2166/wpt.2016.090

Natural Resource Management Ministerial Council, E. P. a. H. C., Australian Health Ministers Conference. (2006). AUSTRALIAN GUIDELINES FOR WATER RECYCLING. In MANAGING HEALTH AND ENVIRONMENTAL RISKS (PHASE1) (pp. 415): Natural Resource Management Ministerial Council, Environment Protection and Heritage Council, Australian

Health Ministers Conference.

Nguyen, M. H. a. D. C. (2018). Hydrological Design of Multipurpose Micro-catchment Rainwater Management.

Palla, A., Gnecco, I., & Lanza, L. G. (2011). Non-dimensional design parameters and performance assessment of rainwater harvesting systems. Journal of Hydrology, 401(1-2), 65-76. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.009

Shokati, H., Kouchakzadeh, M., & Fashi, F. H. (2019). Assessing reliability of rainwater harvesting systems for meeting water demands in different climatic zones of Iran. Modeling Earth Systems and Environment, 6(1), 109-114. https://doi.org/10.1007/s40808-019-00662-3

Steffen, J., Jensen, M., Pomeroy, C. A., & Burian, S. J. (2013). Water Supply and Stormwater Management Benefits of Residential Rainwater Harvesting in U.S. Cities. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 49(4), 810-824. https://doi.org/10.1111/jawr.12038

Ward, S., Memon, F. A., & Butler, D. (2012). Performance of a large building rainwater harvesting system. Water Res, 46(16), 5127-5134. https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.06.043

Yue, T., Zhang, S., Zhang, J., Zhang, B., & Li, R. (2020). Variation of representative rainfall time series length for rainwater harvesting modelling in different climatic zones. J Environ Manage, 269, 110731. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110731

Zhang, S., Zhang, J., Jing, X., Wang, Y., Wang, Y., & Yue, T. (2018). Water saving efficiency and reliability of rainwater harvesting systems in the context of climate change. Journal of Cleaner Production, 196, 1341-1355.

https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.133
건설교통부, 환경부. 친환경건축물인증제도 세부시행지침. (2002)
건축물의 에너지절약설계기준. 국토교통부고시 제 2017-881호 (2008)
국토교통부, 환경부, 한국건설기술연구원. (2020). 2020 녹색건축 인증 연차보고서
녹색건축물 조성 지원법, 법률 제 17229호 (2013)
명수정. (2010). 기후변화 대응책으로서의 빗물 활용
물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률. 법률 제 17326호 (2011)
산업통상자원부. (2018). 2017년도(2016년기준) 에너지총조사보고서
서울특별시. (2016). 녹색건축인증 건축물의 실태 및 거주자 만족도 조사를 통한 인증 후 관리방안 연구
저탄소녹색성장기본법. 법률 제 16646호 (2010)
지방세특례제한법. 법률 제 17598호. (2011)
한국건설기술연구원. (2020). 녹색건축 인증기준 해설서 G-SEED 2016-5 v2
한국상하수도협회. (2013). 물 재이용시설 설계 및 유지관리 가이드라인
한국환경공단. (2017). 지자체 온실가스 배출량 산정지침
환경부, 산업부, 국토부, 해수부, 농식품부, 산림청, 국조실, 과기부, 기재부, 외교부. (2018). 2030년 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 기본 로드맵 수정안
환경부 온실가스종합정보센터. (2021). 2020 국가 온실가스 인벤토리 보고서
환경부. (2011). 2010 상수도 통계
환경부. (2012). 2011 상수도 통계
환경부. (2013). 2012 상수도 통계
환경부. (2014). 2013 상수도 통계
환경부. (2015). 2014 상수도 통계
환경부. (2016). 2015 상수도 통계
환경부. (2017). 2016 상수도 통계

환경부. (2018). 2017 상수도 통계
환경부. (2019). 2018 상수도 통계
환경부. (2020). 2019 상수도 통계

Abstract

Improvement of the G-SEED to Enhance Rainwater Utilization and Reduce Greenhouse Gas Emissions

Jin Park

Dept. of Civil and Environmental Engineering

College of Engineering

The Graduate School

Seoul National University

As the Greenhouse Gas (GHG) Emission Reduction Goal by 37% in 2030 and the 2050 Carbon Neutral Declaration, reduction of GHG emissions is emerging as an important domestic task. Meanwhile, the domestic GHG emission is increasing every year. Especially, the GHG emission in the building sector accounts for about 20% of the total emission. Therefore, the reduction from this sector is greatly required.

The Green Building Certification System (G-SEED) has been implemented based on the Green Building Construction Support Act

for the GHG emission reduction at the building and the green building expansion. However, the rainwater harvesting (RWH) system, which is evaluated in the certification item of rainwater and runoff groundwater utilization, has limitations that it cannot evaluate the performance quantitatively because the rainwater tank capacity is just applied as an evaluation factor and that the regulations on maintenance are insufficient. Hence, this research derived the problems by analyzing the standards for evaluation, design, and maintenance related to the RWH system of the G-SEED and proposed methods to improve them.

Firstly, the RSUD model which is the daily water balance model, and RUR and WSE are selected as evaluation factors to evaluate the performance of the RWH system and proposed the design factors for multi-purposed RWH system. Also, the evaluation criteria for new, existing, and remodeled buildings is proposed. To analyze the GHG emission reduction effects according to the rainwater utilization, the GHG intensity is calculated based on the year and the region. Current G-SEED evaluation criteria and the proposed criteria are compared using the case studies. Lastly, the design criteria for the treatment facility to satisfy the rainwater quality standard and water quality and quantity monitoring standards are proposed for the performance management of the RWH system. As a result, it is confirmed that it can be assigned points differently depending on the environmental performance of the RWH system and that the facilities can be operated stably compared to the current green building certification system.

To utilize the rainwater as an alternative water resource in response

the climate change and to accomplish the national GHG reduction goal, not only RWH system installation but also the performance maintenance by regular and in-depth evaluation of design and management factors is important. Therefore, this research will contribute to improving the RWH system evaluation factor of the G-SEED as a solid basic study.

keywords **: rainwater utilization, greenhouse gas (GHG) emission reduction, Green Building Certification System (G-SEED), rainwater harvesting (RWH) system, performance evaluation, maintenance**

Student Number **: 2019-29750**