

레인가든의 침투성능 및 유출저감효과 평가

유철상·이진욱[†]·조은샘·주국화·최한나*

고려대학교 건축사회환경공학부
*(주)태영건설 기술연구소

Evaluation of Rain Garden for Infiltration Capability and Runoff Reduction Efficiency

Chulsang Yoo·Jinwook Lee[†]·Eunsaem Cho·Ju Hua Zhu·Hanna Choi*

Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
*R&D Team, Research Institute of Technology, TAEYOUNG E&C

(Received: 20 December 2014, Revised: 22 December 2014, Accepted: 23 February 2015)

요약

본 연구에서는 함안군 군북면 소포리 일원에 있는 00부대 이전사업지구에 설치된 레인가든의 특성을 실험을 통해 확인하고, 레인가든의 침투 및 유출을 모의할 수 있는 1차원 모형을 제안하였다. 구축된 모형을 이용하여 설치 후 및 과거 10년간의 강우자료를 이용하여 모의 평가를 수행하였다. 아울러 연최대치 호우사상에 대한 적용 평가를 통해 레인가든이 상쇄시킬 수 있는 불투수면적의 규모를 추정해 보았다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다. (1) 변수위 실험 방법을 적용하여 추정한 레인가든의 투수계수는 0.0188 m/hr인 것으로 나타났다. 아울러 과거 10년간의 강우자료에 대한 모의 실험에서 지붕 전체 면적을 사용하는 경우, 침투량의 비율이 약 90.38%로 나타났다. (2) 지난 10년간의 연최대치 호우사상에 대해 동일한 방법으로 침투모의를 수행한 결과, 본 연구에서 검토한 레인가든은 그 표면적의 30배 정도에 해당하는 불투수면적을 상쇄할 수 있는 침투성능을 가지고 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 레인가든, 유출저감, 저영향개발, 침투성능

Abstract

This study conducted a field experiment to estimate the characteristics of the rain garden installed at the site near Haman, also proposed a one-dimensional model to simulate the infiltration and runoff from the rain garden. This model was used to evaluate the rain garden using the rainfall data after the installation and during the last 10 years. Also, this model was applied to the annual maximum rainfall events to quantify the size of the impervious area that the rain garden can offset the adverse effect. The results are summarized below. (1) Hydraulic conductivity of the rain garden was estimated to be about 0.0188 m/hr by the variable-stage experiment. Also, the simulation experiment using the last 10 years rainfall data over the entire roof area showed that the infiltration amount is about 90.38% out of the total rainfall. (2) Infiltration simulation of the annual maximum rainfall events during last 10 years showed that the rain garden can offset the impervious area with its size about 30 times of the rain garden surface.

Key words : Infiltration Capability, LID, Rain Garden, Runoff Reduction

1. 서론

세계적인 기후변화의 영향이 한반도의 강우패턴 변화와 그로 인한 홍수와 폭설, 가뭄 등의 급격한 기상이변으로 나타나고 있다(Suh and Lee, 2013). 최근 들어 이러한 이상 기후로 인한 피해가 전 세계적으로 증가하고 있다. 아울러

우리나라의 경우도 홍수의 규모와 피해가 과거에 비해 점점 커지고 있는 상황이다. 하천 주변의 도시화 또한 홍수량 증가의 큰 원인으로 작용하면서 인적 또는 재산 피해 규모를 가중시키고 있다(Kim et al., 2004).

도시화 이전에는 강우 시 발생하는 강우유출수가 자연토양층인 투수층으로 침투하여 정체효과를 거친 후 하천으로 유입되었다. 그러나 도시화의 진행과 배수위주의 물관리 정책으로 인하여 불투수층이 증가하면서 많은 문제점을 야기하고 있다(Balmori and Benoit, 2007). 도시지역에서의 불투수성 면적의 증가는 강우 시 표면유출을 증가시키고 도

[†] To whom correspondence should be addressed.
Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering,
Korea University
E-mail: jinwook_@naver.com

달 시간을 감소시킨다(Perez-Pedini et al., 2005). 이로 인해 강우 시 하천의 유량도 급속히 상승할 뿐만 아니라 강우가 토양에 침투하지 못하고 바로 하천으로 배출되면서 지역의 물수지를 왜곡시켜 도시생태계에 심각한 영향을 미치고 있다(Balmori and Benoit, 2007; Ferguson and Suckling, 1990).

한편, 이상 기후에 인한 집중호우가 잦아지면서, 설계빈도 이상의 호우가 빈번히 발생하고 있다. 이로 인하여 홍수방어를 목적으로 설치된 수공구조물 및 내배수시설의 부담이 가중되고 있다. 특히, 도시 내배수시설 체계는 시설용량의 제한으로 인해 이러한 집중호우에 대한 홍수방어 능력의 한계를 가질 수밖에 없다(Park et al., 2013).

지금까지의 빗물관리는 홍수예방을 목적으로 수행되어 왔다. 이를 위해 우수관망, 저류지, 빗물 펌프장 등의 대규모 방재시설을 이용한 집중형 방식이 주로 사용되었다. 그러나 최근에 들어서는 유출 발생원에서 침투, 저류 및 이용을 목적으로 친환경적 빗물관리 방안에 대한 관심이 커지고 있다. 이에 따라, 소위 저영향개발(Low Impact Development, LID)을 적용·개발하는 사례가 증가하고 있다(Kim et al., 2008).

LID는 기존의 집중식 BMPs(Best Management Practices)와는 달리 발생원 단계에서의 처리 기법이다. LID는 유역 내의 투수면적 비율을 최대한 확보함으로써 토양의 수문학적 특성을 유지·보전시켜 유역의 도시화 과정 이후에도 유역의 침투면적을 유지시키고자 한다. 다시 말해 침투유량 뿐만 아니라 홍수 도달시간, 더 나아가 직접 유출량까지도 도시 개발 이전 상태의 수문학적 특성과 유사하게 만들고자 하는 기법이다.

LID 시설 중 효과적 대안의 하나인 우수유출저감시설은 크게 침투형과 저류형으로 구분된다(KWRA, 2009). 침투형 시설은 침투 트렌치, 침투 측구, 침투통, 투수성 포장 등을 말한다. 이들은 불투수층에서 발생하는 직접 유출량을 토양에 일부 침투시켜 홍수저감효과와 함께 도시화로 인해 왜곡된 물순환(water cycle) 구조를 회복시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 저류형 시설은 건물, 주차장, 공원·녹지 등에 홍수량 분담을 위해 설치하는 저류조와 같은 시설을 의미한다(NIDP, 2001). 외국에서는 이미 1970~1980년대부터 홍수 등의 재해예방과 하천의 건천화 방지를 위하여 도로, 주차장 등의 공공시설뿐만 아니라 주택, 아파트 등의 사유시설까지도 우수유출저감시설 설치를 법적으로 제도화하고 있다(NEMA, 2009). 이와 같은 전 세계적인 흐름에 맞추어 국내에서도 우수유출 저감시설과 관련하여 다양한 연구가 진행되어 왔다(SDI, 1995; KICT, 2004; Kim et al., 2004; KSWW, 2005; Song and Im, 2007; NEMA, 2009; 2010).

침투형 우수유출저감 시설 중 하나인 레인가든(rain garden)은 도시지역에서 빗물을 최대한 많이 토양에 침투시켜 보유할 수 있도록 설계된, 움푹하게 파여진 식재 지역이다(Dunnett and Clayden, 2007). 외국의 경우 강우유출

수를 효과적으로 관리하기 위하여 1980년대부터 레인가든에 대한 연구가 시작되었으며, 적용지역의 물수지 회복 및 강우유출수의 수질 정화에 적합하다고 판단하여 미국과 여러 선진 유럽지역에서는 레인가든의 도입이 이미 활성화되어 관련 연구나 현장적용 사례가 증가하고 있다(Davis et al., 2001; Wossink and Hunt, 2003; Hsieh and Davis, 2005; Erikson et al., 2007). 특히 레인가든은 다른 장치형이나 자연형 시설보다 비용 면에서 효율적이라 알려져 있다(Wossink and Hunt, 2003). 따라서 강우유출수의 경제적이고 환경 친화적 제어적인 방법 중 하나로 사용될 수 있는 잠재력이 크다(Kim and Lee, 2007). 레인가든은 오염물질의 자연적인 여과 및 제어 시스템으로 활용될 수도 있기 때문에 특히 도시지역에서 비점원 오염물질 관리 및 LID를 위한 생태공학적 대안으로 활용될 것으로 전망되고 있다(Dietz and Clausen, 2005).

레인가든의 적절한 면적을 산출하는 것은 도시의 물 관리 문제를 해결하기 위한 의사결정 과정에서 반드시 필요하다. 이를 통해 토지의 낭비를 막고 아울러 설치비용을 줄일 수도 있다(김지연 등, 2014). 다시 말해, 적정규모의 레인가든 설치를 위해서는 물론 시설의 성능 평가가 필수적이며, 이를 위해서는 모니터링이 동반되어야 한다.

본 연구에서는 함안군 군북면 소포리 일원에 있는 00부대 이전사업지구에 레인가든을 설치하여 모니터링을 수행하고 수집된 자료를 분석하여 이 시설을 평가하고자 한다. 먼저, 모니터링을 통해 레인가든의 침투특성을 파악하고자 한다. 파악된 침투 특성을 반영하여 레인가든의 유입량을 변화시켜가며 유입량 대비 우수유출 저감효과를 알아보고자 한다. 아울러 레인가든의 설치 시점 이후의 강우자료를 이용하여 침투 모의를 수행하여, 변화를 살펴보고자 한다. 보다 정확한 레인가든의 성능 평가를 위해 최근 10년간 함안군 AWS 자료를 이용하여 같은 방식으로 모의를 수행할 것이다. 아울러 각각의 모의과정에서 레인가든에 연결된 지붕의 면적을 여러 가지 조건으로 적용해 보고자 한다.

최종적으로, 위 과정들을 통해 산정된 모의 결과를 이용하여 레인가든의 유출 저감 특성을 분석하고, 이를 통해 설치된 레인가든이 수용할 수 있는 적절한 지붕의 면적 또는 지붕과 레인가든의 비율을 산정함으로써 레인가든의 침투 성능과 우수저감효과를 평가하고자 한다. 적절한 레인가든의 면적 또는 레인가든이 수용할 수 있는 적절한 불투수면적을 산출하는 것은 도시 물 관리 문제를 해결하기 위한 의사결정 과정에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1 시설설명

2.1.1 대상지역

본 연구의 대상지역은 함안군 군북면 소포리 일원에 있는 00부대 이전사업지구이다. 본 지역은 군부대 이전 시설 중 주거공간에 해당하는 지역으로서 총 면적은 3.07 ha이고

독신자숙소 3동과 간부부대시설 및 주차장, 도로 등으로 구성되어 있는 지역이다. 아래 Fig. 1과 같이 레인가든은 202동과 203동에 설치되었다. 현장 모니터링에 사용된 레인가든(rain garden)은 202동 옆에 있는 시설이다.

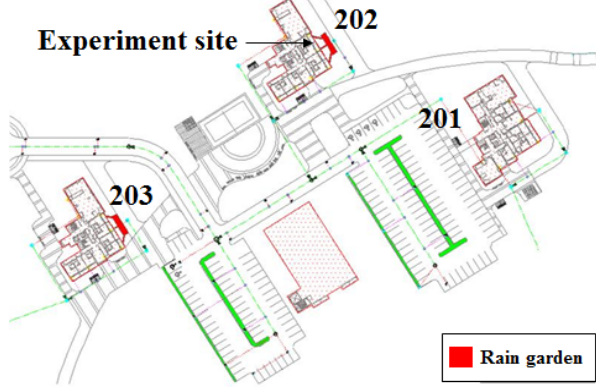


Fig. 1. Locations of rain garden and experiment site in test bed

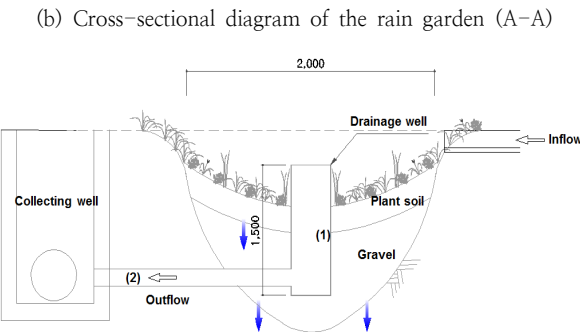
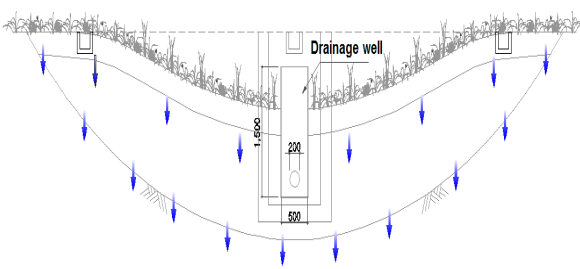
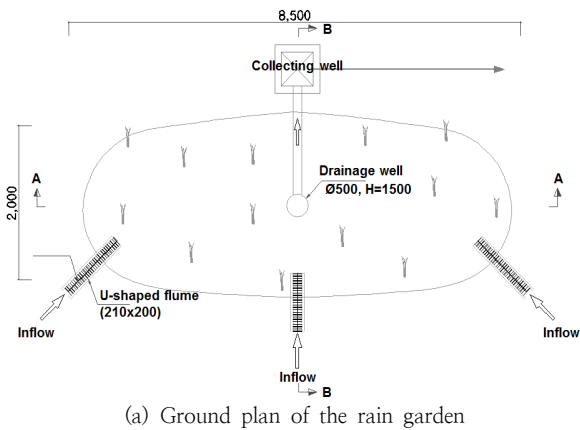


Fig. 2. Design plan of the rain garden(overlay of rain garden, 2013)

2.1.2 레인가든 구조

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 레인가든의 설계도면을 나타낸다. 먼저, Fig. 2(a)는 본 연구에서 사용된 레인가든의 평면도이다. 아울러 Figs. 2(b) and 2(c)는 각각 시설의 장축, 단축 방향으로의 단면도를 나타낸다. 레인가든은 유입된 강우유출수가 정체하면서 토양으로 침투하여 지표유출을 효과적으로 저감시키는 것이 중요하다. 이러한 이유로, 레인가든은 Fig. 2와 같이 오목한 형태로 설계하는 것이 일반적이다.

본 시설은 인도 옆 조정공간에 단축 2 m, 장축 8.5 m를 가진 타원의 형태와 유사하게 설치되었다. 강우 시 202동의 지붕에 내린 우수는 관거에 연결된 세 개의 홈통으로부터 레인가든으로 유입된다. 유입된 우수는 레인가든 전반에 걸쳐 널리 퍼짐과 동시에 연직 방향으로 침투된다. 침투된 우수는 침투되거나 일시적으로 저류되며, 이는 레인가든의 포화 정도에 따라 좌우된다. 레인가든으로부터의 유출은 먼저 월류형 집수정에 연결된 우수관거를 통해 이루어진다. 침투로 인해 월류형 집수정의 수위가 높아지고, 이 수위가 우수관거의 수위 보다 높아지게 되면 우수관거를 통해 유출이 발생한다. 만일 지속적인 강우로 인해 레인가든 내 수위가 집수정의 높이보다 높아지면, 월류를 통해 집수정으로 직접 물이 유입되고 이 물은 또한 우수관거를 통해 배제된다.

본 연구에서는 레인가든의 성능 평가를 위해 월류형 집수정에 쇠자를 부착하여 수위변화를 관측하였다. 아울러 유출량의 변화를 관측하기 위해 우수관거에 유량계를 부착하였다.

2.2 레인가든의 침투 특성 파악

2.2.1 실험 개요

본 연구에서는 먼저 레인가든의 침투 특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 실험은 2014년 10월 24일 금요일 10시 30분부터 약 3시간에 걸쳐 이루어졌다. 실험의 세부적인 사항들은 다음과 같다.

먼저 레인가든에 약 1.5 m³/hr의 유량을 레인가든 내 수위가 일정해 질 때까지 공급하였다. 수위가 일정해진 이후 유량 공급을 중단하고 떨어지는 수위를 관측하였다. 관측은 약 한 시간 동안 수행되었다. 이후 다시 3.4 m³/hr의 유량을 1시간 동안 공급하였고, 이후 유량을 2 m³/hr로 줄여 30분간 공급한 뒤 최종적으로 유량 공급을 중단하였다. 전 과정에 걸쳐 약 10분 간격으로 월류형 집수정 내 수위를 관측하였으며, 수위가 비교적 급격히 변하는 11:45~12:09, 12:45~12:49 구간에서는 약 2분 간격으로 수위를 관측하였다. 유량 공급을 중단한 13시 13분 이후에도 수위관측을 계속하였으며, 약 50분 후인 14시 01분에 실험을 종료하였다. 실험 전반에 걸친 유입량과 월류형 집수정 내 수위변화는 다음 Fig. 3과 같다.

월류형 집수정에 연결된 우수관거를 통한 유출량에 대한 관측은 HVFlo 유량계를 이용하여 수행하였다. 정식명칭은 HVFlo XGi이며, 제조사는 Measuring & Control Equipment (MACE) Pty Ltd이다. 이 유량계는 도플러 효과를 이용하여 유속을 측정한다.

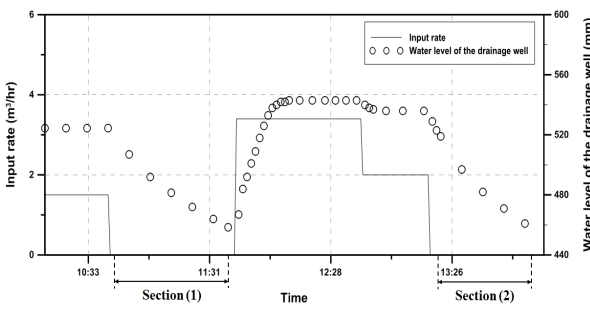


Fig. 3. Monitoring result according to input conditions

2.2.2 유량계 검보정

레인가든에 대한 평가는 장기간의 관측을 통해서도 가능하지만 현실적으로 모의 과정을 통한 수밖에 없다. 이를 위해서는 레인가든의 특성인 투수계수의 산정과 월류형 집수정에 연결된 우수관거로의 유출량이 정확히 계산되어야 한다. 본 절에서는 먼저 우수관거로의 유출량 계산 및 유량계로 측정된 자료를 이용한 검증 부분을 다루보기로 한다.

월류형 집수정의 수위를 이용하여 우수관거로의 유출을 계산하는 방법은 다음과 같다. 관거 내의 흐름을 개수로 등류흐름으로 가정하였을 때, Manning의 공식과 연속방정식을 이용하면 관거 내의 유량은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Q &= A \cdot v = A \cdot \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \\
 &= A \cdot \frac{1}{n} \left[\frac{D}{4} \left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta} \right) \right]^{2/3} S^{1/2} \\
 &= \frac{D^2}{8} (\theta - \sin \theta) \cdot \frac{1}{n} \left[\frac{D}{4} \left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta} \right) \right]^{2/3} S^{1/2}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, A 는 통수단면, P 는 윤편(wetted parameter), R 은 동수반경(hydraulic radius), S 는 경사(slope), n 은 조도계수(roughness coefficient)이다. 또한 θ 는 우수관거의 중심으로부터 수면의 양쪽 끝을 연결한 직선들의 사잇각을 뜻하며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta = 2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{2h}{D} \right)
 \tag{2}$$

여기서 h 는 월류형 집수정의 수위를 이용하여 추정된 관거 내 수위(mm)이며, D 는 관거의 직경(mm)을 뜻한다. 본 연구에서는 우수관거를 콘크리트 파이프의 보통 상태로 보고 n 값으로 0.015를 사용하였다. 아울러 경사는 00부대 이전 사업의 우수계획평면도 및 우수중평면도를 참고하여 3%, 즉 0.003을 적용하였다.

Fig. 4는 현장에서 측정된 월류형 집수정의 수위를 이용해 계산한 유량값과 유량계를 이용하여 측정된 유량을 비교하여 나타낸 것이다. 둘 사이의 상관계수(coefficient of correlation)도 0.96으로 나타나, 관측 수위를 이용하여 계산한 유량과 유량계를 이용하여 측정된 유량이 매우 유사하다는 것을 확인할 수 있었다.

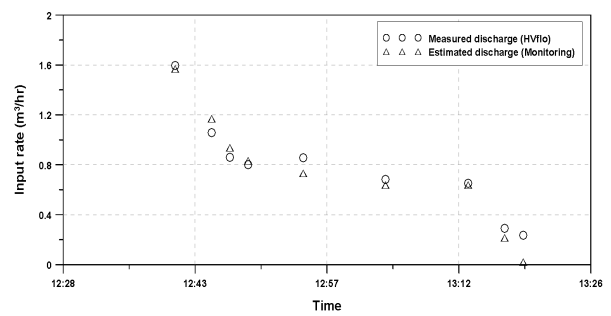


Fig. 4. Comparison of measured discharge (HVflo) and estimated discharge (monitoring)

2.2.3 투수계수 산정

레인가든을 통한 침투량을 계산하기 위해서는 레인가든의 침투특성이 먼저 파악되어야 한다. 실험을 통해 침투특성 또는 투수계수를 결정하는 방법으로 정수위 투수실험과 변수위 투수실험이 있다. 본 연구에서의 실험은 정수위 투수실험보다는 변수위 투수실험에 가까우며, 따라서 이 방법의 개념을 이용하여 투수계수를 산정하였다.

Olsen and Danial (1981)이 제안한 변수위 실험을 통한 투수계수의 산정 방법은 다음과 같다. 먼저, 스탠드파이프에 h_1 만큼 물을 채운다($t_1 = 0$). 시간 t 까지 흐른 뒤, 이때의 수위 h_2 를 기록한다. 시간 t 일 때의 수위 즉 전수두를 h 라고 하자. 단위시간 dt 동안에 dh 의 수위 하락이 있었다면 이로 인한 유량감소는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$dQ = a(-dh)
 \tag{3}$$

여기서, a 는 스탠드파이프의 단면적이며, 수위선은 계속 하락하므로 dh 값은 (-)이다. 양수로 만들어 주기 위해, dh 앞에 (-)부호를 붙였다. 한편, dt 시간 동안 흠을 빠져 나간 유출량은 식 (4)와 같다.

$$dQ = Ki A dt = K \frac{h}{L} A dt
 \tag{4}$$

위의 두 유량은 같아야 하므로,

$$a(-dh) = K \frac{h}{L} A dt
 \tag{5}$$

위 식을 정리하여, $t = 0$ 부터 $t = t$ 까지 적분하여 투수계수를 산정하는 과정은 다음과 같다.

$$dt = \frac{aL}{AK} \left(- \frac{dh}{h} \right)
 \tag{6}$$

$$\int_0^t dt = \frac{aL}{AK} \int_{h_1}^{h_2} \left(- \frac{dh}{h} \right)
 \tag{7}$$

$$t = \frac{aL}{AK} \ln \frac{h_1}{h_2}
 \tag{8}$$

$$K = 2.303 \frac{aL}{At} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (9)$$

여기서, A 는 시료의 단면적(m^2), a 는 스탠드 파이프의 단면적이다. 아울러 L 은 시료가 차지하는 높이를 말한다. 또한 h_1 과 h_2 는 각각 처음의 수위와 시간 t 일 때의 수위를 뜻한다.

식 (9)를 레인가든에 적용하기 위해서는 레인가든의 제원을 위 식에 대응시켜야 한다. 변수위실험 결과를 이용하여 투수계수를 구하는 과정은 다음과 같다. 먼저, a 는 월류형 집수정의 면적(m^2)이 되며, 바로 아래쪽에 존재하는 토양층의 기둥 면적은 $A(m^2)$ 가 된다. 아울러 L 은 레인가든의 바닥으로부터 월류형 집수정 바닥면까지의 높이(mm)가 되고, h_1 은 전 시간의 관측 수위(mm)에 월류형 집수정 바닥면까지의 높이를 더한 값이 된다. 마찬가지로 h_2 는 다음 시간의 관측수위(mm)에 집수정 바닥면까지의 높이를 더한 값이 된다. 이 때, 레인가든에서 월류형 집수정의 면적(a)과 바로 아래쪽의 토양층의 면적(A)은 같은 값을 가지므로 서로 소거된다. 따라서, 최종적으로 투수계수를 구하는 식은 식 (10)과 같이 변형된다.

$$K = 2.303 \frac{L}{t} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (10)$$

본 실험에서는 투입량을 변화 시키면서, 그에 따른 수위의 변화를 관찰하였다. 본 연구에서의 투수계수 산정에는 유출이 발생하지 않는 기간의 수위자료를 이용하였다. 즉, 실험 초기(구간 1)와 실험 후반(구간 2)에 해당하는 구간이다(Fig. 3). 투수계수를 산정한 결과는 다음 Table 1과 같다. 본 연구에서는 비교적 안정화된 상태에서부터 감소되는 부분인 1구간에 대한 값들을 평균하여 레인가든의 투수계수를 0.005229 mm/sec로 결정하였다. 이는 0.314 mm/min 또는 18.84 mm/hr와 같은 값이다.

Table 1. Monitored water level and hydraulic conductivity of rain garden

Section	Time	Water level of the drainage well (mm)	h (mm)	K (mm/min)
Section 1	10:53	507.0	707.0	
	11:03	492.0	692.0	0.4289
	11:13	481.5	681.5	0.3058
	11:23	472.0	672.0	0.2808
	11:33	464.0	664.0	0.2395
Section 2	13:21	519.0	719.0	
	13:31	497.0	697.0	0.6215
	13:41	482.0	682.0	0.4351
	13:51	471.0	671.0	0.3252
	14:01	461.0	661.0	0.3003

Table 1과 같이 결정된 투수계수는 토양이 습윤한 상태의 값이다. 이 값을 레인가든의 투수계수 K 로 결정하고, Darcy 법칙을 적용하면 침투율을 계산할 수 있다.

$$f_p = K \frac{h}{L} \quad (11)$$

여기서, L 은 포화된 토양의 길이이고, h 는 레인가든 바닥을 기준으로 한 수위를 말한다. L 은 월류형 집수정 아래에 존재하는 토양층의 두께를 의미한다.

2.3 유입량의 영향 평가

2.3.1 평가를 위한 일차원 모형 구축

2.2절에서 결정한 우수관거 내의 수위-유량 관계와 투수계수를 적용하여 간단한 1차원 모의모형을 구축하였다. 이 모형의 개념은 Fig. 5와 같다. 먼저, 레인가든을 시설의 지표면 부분 면적과 동일한 단면적($13.35 m^2$)을 가지는 타원형 탱크라고 가정하였다. 타원형 탱크의 상단부에서는 강우의 유입이 이루어지고, 바닥면을 통해 침투가 발생한다. 침투를 초과한 유입량은 탱크 내에 저류되며, 탱크 내 수위가 일정수준 이상이면 측면출구(side outlet)를 통해 유출이 발생한다. Fig. 5에서 $H(t)$, $F(t)$, $I(t)$ 및 $Q(t)$ 는 각각 시간 t 에서의 레인가든 바닥으로부터의 수위, 침투량, 유입량 및 월류형 집수정과 연결된 우수관거로부터의 유출량을 나타낸다. 레인가든의 구조상 외부로부터의 유입은 없다고 가정하였다.

전체적인 모의과정은 다음과 같이 설명할 수 있다. 먼저, 유입량은 식 (12)와 같이 계산다.

$$I(t) = R(t) \times AR + R(t) = (1 + AR)R(t) \quad (12)$$

여기서 $R(t)$ 는 시간 구간 당 깊이(mm/10 min)로 표현되는 강우량이다. 아울러 AR (area ratio)은 레인가든이 담당하는 불투수 지역의 면적과 침투시설의 면적비이다. 즉, 본 연구에서는 지붕과 레인가든의 면적비를 말한다. 최종적으로 모형에서의 유입량은 지붕에 내린 강우와 레인가든 자체에 내린 강우를 합한 값이 된다. Fig. 2(a)의 유입부(U-flume) 자체에 내린 강우는 상당히 작은 양(지붕 면적의 약 0.1%)이므로 고려하지 않았다. 실험에서는 인공적으로 유입량을 공급하는 형태이므로 그 양이 바로 유입량이 된다.

월류형 집수정의 수위를 뜻하는 $H(t)$ 를 구하기 위해서는 전 시간의 수위조건에 따라 다음 두 가지 상황이 존재한다. 첫 째는, 전 시간의 수위가 월류형 집수정에 연결된 우수관거 보다 낮을 경우이다. 이 때, $H(t)$ 는 식 (13)과 같이 간단히 계산된다.

$$H(t) = H(t-1) - F(t-1) + I(t) \quad (13)$$

한편, 전 시간의 수위가 월류형 집수정의 우수관거보다 높은 경우에는 식 (14)와 같이 우수관거를 통해 빠져나가는 유출량을 추가로 고려해주어야 한다.

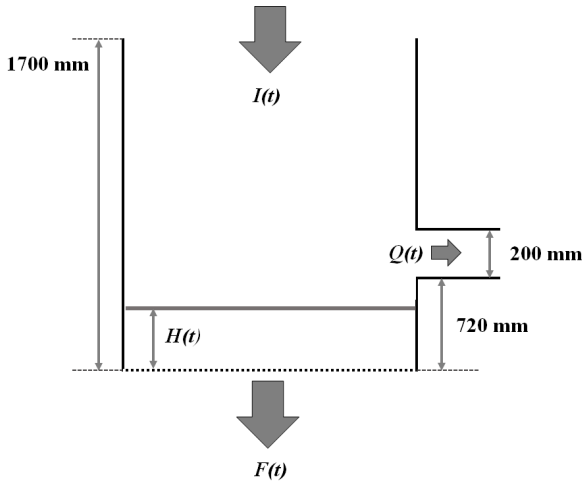


Fig. 5. Simple 1-D model used for simulation

$$H(t) = H(t-1) - F(t-1) + I(t) - Q(t-1) \quad (14)$$

마지막으로 침투량은 다음과 같이 계산된다. 투수계수로는 앞서 구한 0.314 mm/min을 적용하고, 침투율에 Darcy 법칙을 적용하여 계산하였다. 침투율에 Darcy 법칙을 적용하면 다음과 같다.

$$F(t) = K \frac{h(t)}{L} \quad (15)$$

여기서, L 은 포화된 토양의 길이이고, $h(t)$ 는 레인가든 바닥을 기준으로 한 수위를 말한다. 따라서 L 은 월류형 집수정 아래에 존재하는 토양층의 두께인 200 mm가 된다. 시간 구간 내에서의 침투율은 일정하다고 가정하고 침투량을 산정하였다.

이상과 같은 방법으로 실험 기간 동안의 수위변화를 모의한 결과는 Fig. 6과 같다. 아울러 Fig. 7은 모의된 우수관거로부터의 유량과 관측유량을 비교한 것이다. Fig. 6 및 Fig. 7의 상관계수는 각각 0.95, 0.90로, 구축된 1차원 모형은 레인가든의 특성을 잘 나타내고 있는 것으로 판단된다.

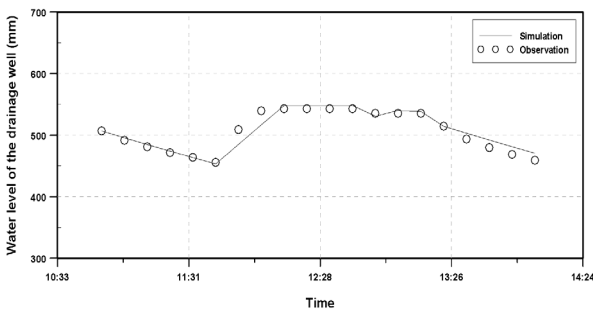


Fig. 6. Comparison between simulation and observation about water level

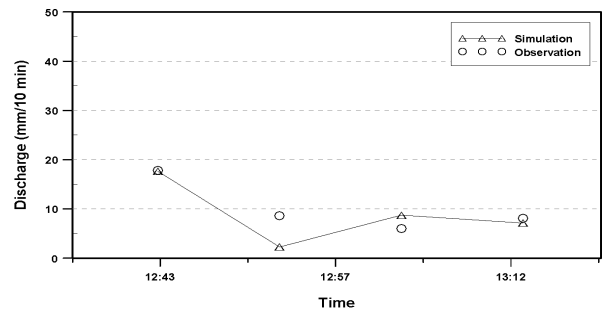


Fig. 7. Comparison between simulation and observation about discharge

2.3.2 유입량의 영향 평가

레인가든의 성능은 유입량 조건에 따라 크게 달라진다. 유입량이 작다면 대부분의 유입량이 침투될 것이나, 많다면 유출량이 침투량보다 많아질 것이다. 그러나 현재 상태에서 레인가든의 적정규모가 어느 정도인지를 판단하기는 어려우므로 본 연구에서는 가용한 지붕면적을 고려하여 유입량 조건을 설정하였다.

본 연구에서는 레인가든과 연결된 지붕의 전체 면적을 모두 사용하는 경우, 1/2만을 사용하는 경우 및 1/4만을 사용하는 경우를 고려하였다. 지붕 전체의 면적은 208 m²이며, 1/2만을 사용하는 경우는 그 면적이 104 m², 1/4만을 사용하는 경우는 52 m²이 된다. 입력 자료로는 대상 지역의 인근에 위치한 군북면 AWS의 2014년 6월 1일 0시부터 2014년 11월 31일 24시까지의 10분 단위 강우자료를 사용하였다.

사용하는 지붕 면적에 따라 유입조건은 달라진다. 본 연구에서 고려한 3가지 유입조건에 대한 모의 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8(a)는 전체면적의 1/4, Fig. 8(b)는 전체면적의 1/2, 마지막으로 Fig. 8(c)는 지붕 전체면적을 모두 사용한 경우에 대한 강우량, 유입량, 침투량 그리고 유출량을 보여준다.

Fig. 8에서 살펴볼 수 있는 것처럼 지붕 면적의 1/4만을 사용하는 경우에는 유출이 전혀 발생하지 않았다. 유입되는 모든 강우가 침투된 것이다. 그러나 지붕면적의 1/2을 사용한 경우에는 총 6회의 유출이 발생하였으며, 유출의 최댓값은 98.68 mm/10 min으로 이는 약 2.20 m³/sec에 해당한다. 전체 유입량에 대한 총 침투량의 비율은 약 98.09%이며, 유출량의 비율은 1.70%이다. 마지막으로 지붕 전체를 사용한 경우에는 총 27회의 유출이 발생하였고, 유출의 최댓값은 699.74 mm/10 min (15.57 m³/sec)인 것으로 나타났다. 전체 유입량에 대한 총 침투량의 비율은 약 81.45%로 이전의 경우보다 작게 나타나기는 했지만 여전히 침투량이 매우 큰 수준인 것으로 확인되었다.

현재 설치된 레인가든의 위치 및 구조를 고려하면 레인가든으로 물을 공급할 수 있는 방법은 지붕을 이용하는 것 밖에는 없다. 지붕의 1/4을 사용하는 것에 비해 1/2을 사용하는 경우에는 유입량이 2배가 되며, 지붕 전체를 사용하는 경우에는 4배가 된다. 지붕 면적이 증가하면 늘어난 유입량의

로 인해 전체 유입량 대비 침투량의 비율은 줄어들지만, 침투 총량은 증가한다. 즉, 레인가든을 최대한 활용할 수 있도록 지붕 전체면적을 이용하여 레인가든에 물을 공급해주는 것이 가장 효율적이다. 전체면적의 1/4 또는 1/2만을 사용할 경우 유출이 거의 발생하지 않을 정도로 레인가든의 용량이 크기 때문이다. 그러나 지붕 전체면적을 다 사용하는 경우에도, 레인가든의 규모가 아직 큰 것인지 또는 적절한 것인지에 대한 판단은 어렵다. 이러한 문제의 해답은 다음 장에서의 분석을 통해 얻을 수 있을 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 레인가든의 장기 침투모의

본 연구에서는 2004년 1월 1일 0시부터 2013년 12월 31일 24시까지(10개년)의 군북면 AWS 10분 단위 강우자료를 이용하여 침투모의를 수행하였다. 유입조건도 앞에서와 동일한 3가지를 고려하였다. 이러한 모의는 레인가든 설치 지역의 기후적인 특성을 반영할 때 레인가든의 성능이 어느 정도인지를 판단하기 위함이다. 또한 여기서 유도된 결과는 레인가든 하나가 상세할 수 있는 불투수 면적을 파악

하기 위해 사용될 것이다. 모의 결과는 Fig. 9와 같다.

Fig. 9에서 살펴볼 수 있는 것처럼 지붕 면적의 1/4를 고려한 경우는 강우의 대부분이 침투되는 것으로 나타났다. 유출이 10년간 총 12회 발생하였다. 유출의 최댓값은 14 mm/10 min 정도로 약 0.31 m³/sec에 해당한다. 아울러, 총 강우량 대비 침투량의 비율은 99.86%에 이르는 것으로 확인되었다. 이와 반대로, 지붕 전체 면적을 1/2만큼 사용하는 경우에는 10년간 총 95회의 유출이 발생하였다. 유출의 최댓값은 345.30 mm/10 min(약 7.68 m³/sec)이었고, 총 유입량 대비 침투량의 비율은 약 97.55%인 것으로 확인되었다. 마지막으로, 지붕 전체 면적을 사용하는 조건에서는 10년간 총 373회의 유출이 발생하였다. 유출의 최댓값은 781.12 mm/10 min(17.38 m³/sec)이었으며, 총 유입량 대비 침투량의 비는 90.38% 정도인 것으로 나타났다.

3.2 레인가든의 유출저감 특성

레인가든의 역할은 직접 유출량을 감소시키고 침투량을 증가시키는 것이다. 이러한 역할은 침투량을 감소시키고 직접 유출량을 증가시키는 불투수층과 정 반대이다. 본 연구에서는 이러한 특성을 소위 유출곡선지수라 불리는 CN(Curve

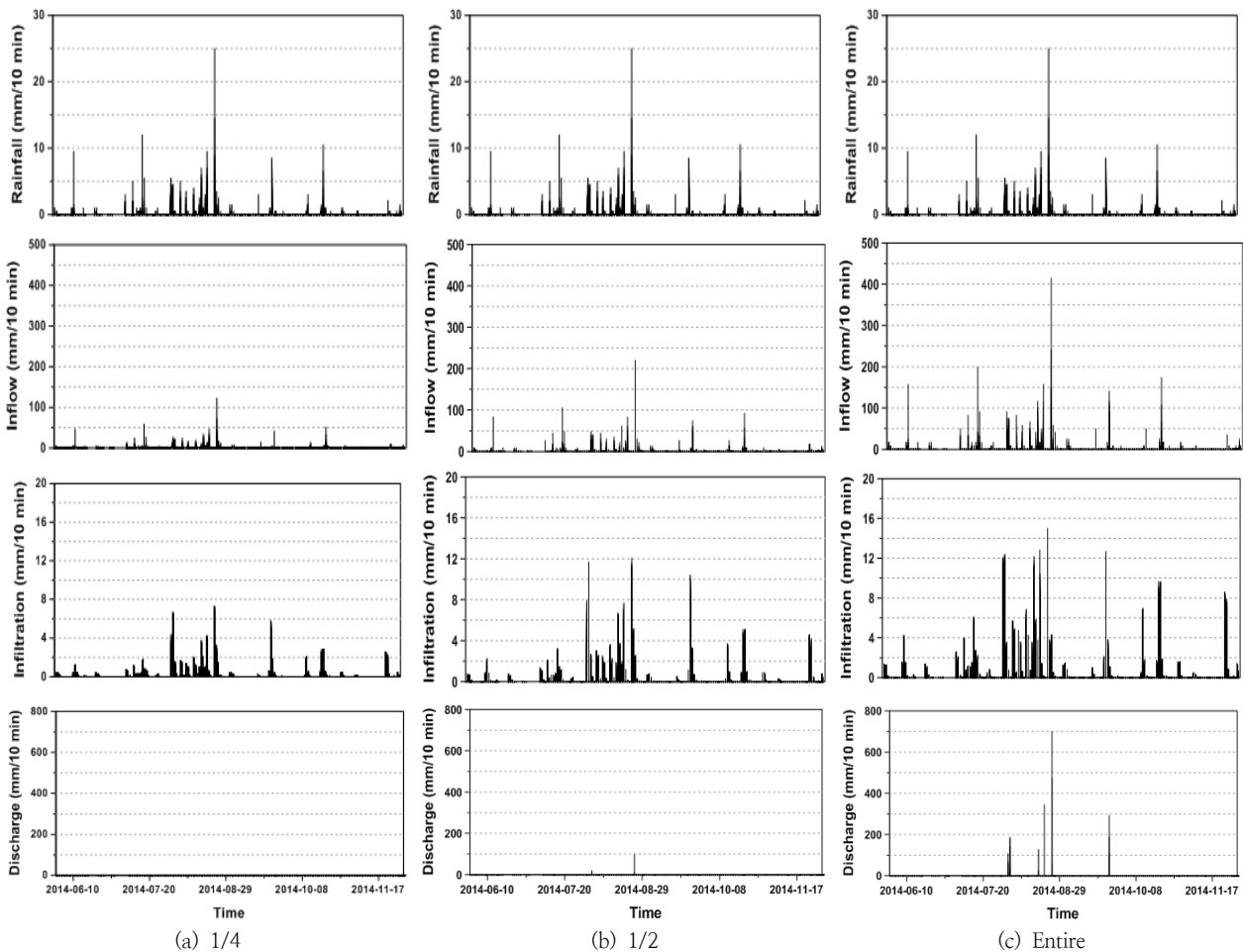


Fig. 8. Simulation results of infiltration and outflow with different inflow conditions considering one quarter (a), one half (b) and entire roof area (c) from June to November, 2014

Number)값을 가지고 분석해 보고자 한다. 잘 알려진 것과 같이 불투수층의 증가는 CN값을 증가시키고, 침투량의 증가는 반대로 CN 값을 감소시킨다.

미국 Natural Resources Conservation Service(NRCS)가 1972년 개발한 유출곡선지수방법(runoff curve number method)은 국내에서 널리 이용되고 있는 유효우량산정 방법이다. 이 방법은 1970년대 후반 선우중호 등(1977)에 의해 국내에 처음으로 소개되었다. 그 후 현재까지 NRCS 유출곡선지수 방법을 이용한 연구들이 다수 발표되었다(Park et al., 2005a, 2005b; Yoo et al., 2005).

유출곡선지수방법에서는 유역 내 토양종류(soil type)를 분류하여 나타낸 토양도(soil map)와 토지이용상태(land use pattern)를 나타낸 토지이용도(land use map), 그리고 식생 피복의 처리상태(vegetal cover treatment) 및 토양의 수문학적 조건(hydrologic condition) 등을 고려한다. 이들 인자들을 고려하여 직접유출량(혹은 유효우량)에 미치는 복합적인 영향을 0에서 100 사이의 값을 가지는 무차원의 유출곡선지수로 정량화 한다. 따라서 이 방법은 유역특성을 간단한 유출곡선 지수로 정량화한다. 따라서 이 방법은 유역특성을 간단한 유출곡선지수로 정량화하여 평가할 수 있

다는 장점을 가진다. NRCS 방법에서는 총우량과 유효우량 간의 관계를 다음과 같이 나타낸다(Yoon, 2007).

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \tag{16}$$

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \tag{17}$$

$$I_a = 0.2S \tag{18}$$

여기서 P 는 호우별 총우량(mm), S 는 유역의 최대잠재보유수량(potential maximum retention)(mm), I_a 는 초기 손실(mm)이다. NRCS 방법에서는 유역의 토양이나 토지이용 및 식생피복 처리상태 등 이른바 수문학적 토양-피복도의 성질에 따라 다르며, 유출능력을 표시하는 유출곡선지수라는 변수를 정의함으로써 유출에 미치는 S 의 효과를 간접적으로 고려한다(Yoo et al., 2010).

본 연구에서는 수집된 강우자료 중 연최대치 호우사상만

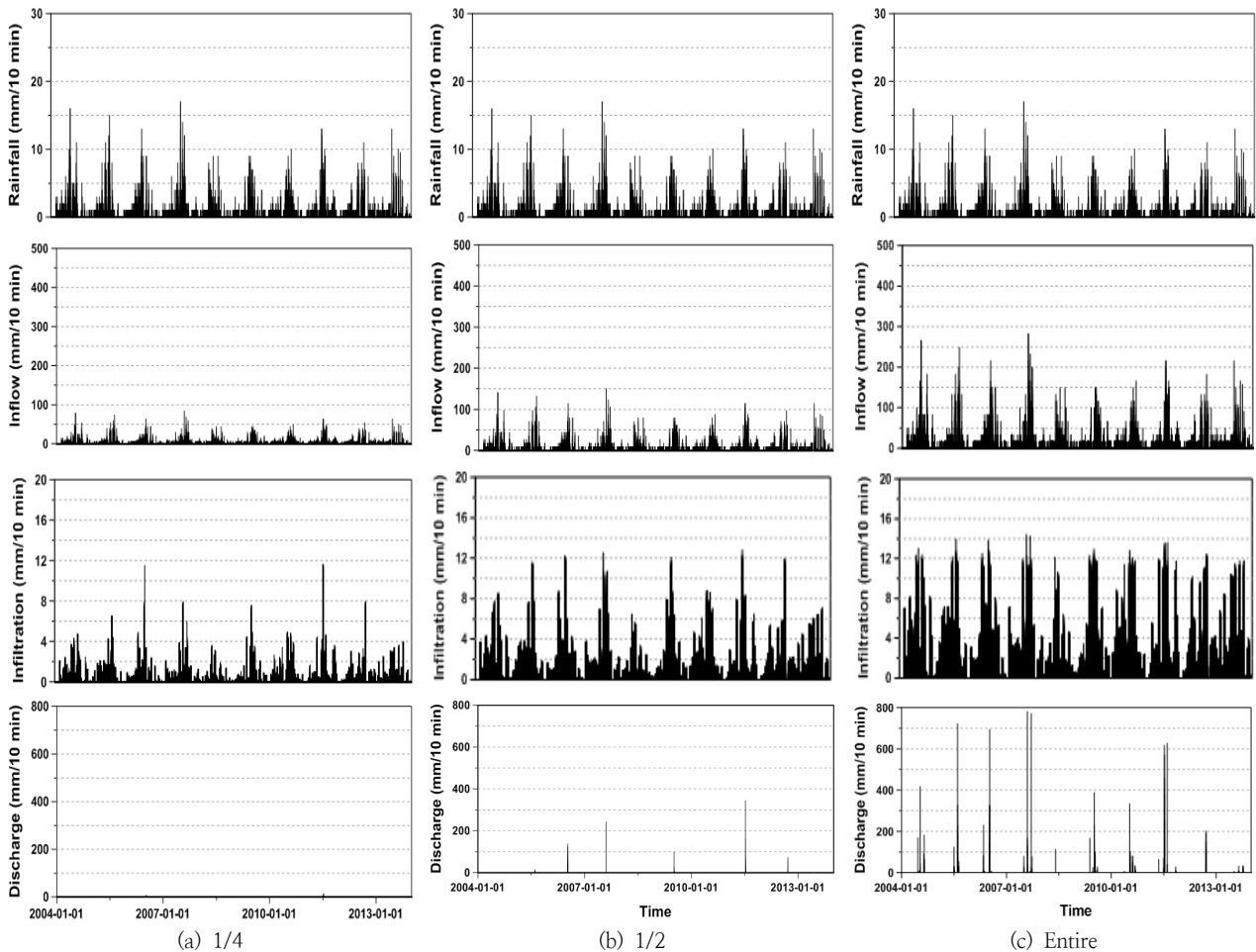


Fig. 9. Simulation results of infiltration and outflow with different inflow conditions considering one quarter (a), one half (b) and entire roof area (c) from 2004 to 2013

Table 2. Rainfall events considered in this study

No	Year	P ₅ (mm)	AMC	Duration (min)	Total rainfall (mm)
1	2004	107	III	2040	184.0
2	2005	41	II	1450	183.0
3	2006	156	III	660	202.0
4	2007	6	I	4970	196.0
5	2008	1	I	1730	68.0
6	2009	22	I	720	149.0
7	2010	131	III	2410	149.0
8	2011	96	III	1900	361.0
9	2012	7	I	2550	207.0
10	2013	92	III	2730	105.5

Table 3. CNs estimated for each rainfall event in Table 2

Year	Total rainfall (mm)	Infiltration (mm)	Discharge (mm)	CN
2004	184.0	142.6	41.4	48.1
2005	183.0	111.0	72.0	66.0
2006	202.0	67.1	134.9	77.7
2007	196.0	128.2	67.8	55.7
2008	68.0	68.0	0.0	0 - 42.8
2009	149.0	78.3	70.7	70.9
2010	149.0	130.0	19.0	45.0
2011	361.0	120.2	240.8	66.0
2012	207.0	137.6	69.4	53.9
2013	105.5	101.5	4.0	43.1

을 뽑아 각 호우사상별로 레인가든의 성능이 어떻게 나타나는지를 평가하였다. 총 강우량과 모의를 통해 산정된 직접 유출량(유효 강우량)을 이용하여 CN 값을 역산하면, 이를 통해 레인가든의 유출저감효과를 정량화할 수 있다.

먼저 선정된 호우사상에 대한 선행 5일 강수량, 선행토양 함수조건, 지속기간 그리고 총 강우량은 Table 2와 같다. Table 2 및 Table 3에서 확인할 수 있는 것처럼 2011년의 호우사상이 총강우량 361.0 mm로 가장 큰 것으로 나타난 반면, 2008년의 호우사상은 총강우량 68.0 mm로 가장 작은 것으로 나타난다.

Table 2에 주어진 호우사상에 대해서 침투모의를 수행하였다. 강우 유입은 지붕면 전체와 레인가든 자체에 내리는 강우의 합이라고 가정하였다. 계산된 침투량과 유출량을 이용하여 각 사상별 CN 값을 역으로 추정하였다. 그 결과를 정리하면 다음 Table 3과 같다.

Table 3의 결과는, 먼저, 호우사상의 특성에 따라 레인가든의 역할이 크게 달라짐을 보여 준다. 예를 들어, 가장 작은 호우사상인 2008년 호우사상의 경우에는 유출이 전혀 발생하지 않았고, 이에 따라 CN 값은 최소 0에서 최대 42.8까지가 가능한 것으로 계산되었다. 그러나 2006년 호우사상의 경우에는 10분당 강우량이 18.36 mm/10 min에 달하였고, 이로 인해 침투량에 비해 유출량이 매우 크게 나타났다. 결과적으로 CN 값은 77.7로 다른 호우사상에 비해 매우 크게 계산되었다. 전체적인 평균 CN 값은 약 50

정도로 나타났다.

아래 표에서 주목할 만한 또 다른 내용은 침투량과 유출량의 비율이다. CN 값이 77.7로 계산된 2006년 호우사상의 경우 침투량은 유출량의 절반정도로 나타났다. 그러나 CN 값이 55.7로 계산된 2007년 호우사상에서는 침투량이 유출량의 2배로 크게 증가했음을 확인할 수 있다. 만일, 이 호우사상에 대한 침투량은 그대로 두고 유출량만을 4배 정도 늘려주게 되면, 다시 말해 침투량과 유출량의 비가 1:2가 되게 하면 CN 값은 대략 75 정도가 된다. 이러한 결과는, 지난 10년간의 연최대치 호우사상의 평균적인 특성을 고려할 때, 지붕 면적을 현재의 2배로 하더라도 CN 값은 75 정도로 나타남을 의미한다. 사실 본 연구 대상지역의 개발 전 CN 값이 75 정도이다(관목숲, 토양군 B 적용). 즉, 현재 설치된 레인가든은 표면적의 30배 정도의 불투수 면적을 충분히 상쇄시킬 수 있는 침투능력을 가지고 있다고 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 함안군 군북면 소포리 일원에 있는 00부대 이전사업지구에 설치된 레인가든의 특성을 실험을 통해 확인하고, 아울러 설치 후 및 과거 10년간의 강우자료를 이용하여 모의 평가를 수행하였다. 아울러 연최대치 호우사상에 대한 적용 평가를 통해 레인가든이 상쇄시킬 수 있는 불

투수면적의 규모를 추정해보았다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 번수위 실험 방법을 적용하여 추정된 레인가든의 투수계수는 0.0188 m/hr인 것으로 나타났다. 결정된 투수계수는 관측된 침투량 및 유출량을 잘 재현하는 것으로 확인되었다.

(2) 본 연구에서는 레인가든의 침투 및 유출을 모의할 수 있는 1차원 모형을 제시하였다. 이 모형을 이용하여 과거 10년의 강우자료를 이용한 침투모의를 수행하였다. 그 결과 지붕 전체 면적을 사용하는 경우 총 373회의 유출이 발생하는 것으로 확인되었고, 침투량의 비율은 약 90.38%인 것으로 나타났다. 특히, 총 침투량은 연 평균 248,754 m³으로 지붕의 전체 면적을 사용하는 것이 전체 면적의 1/4 또는 1/2만을 사용하는 것에 비해, 더욱 효과적인 것으로 확인되었다.

(3) 지난 10년간의 연최대치 호우사상에 대해 동일한 방법으로 침투모의를 수행하였다. 계산된 침투량과 유출량을 고려하여 CN 값을 역으로 추정하였다. 총 10개의 연최대 호우사상에 대해 계산한 CN 값의 평균은 약 50 정도로 나타났다.

(4) 개발 전 대상 지역의 CN 값이 75정도인 점을 감안하면, 본 연구에서 검토한 레인가든은 그 표면적의 30배 정도에 해당하는 불투수면적을 상쇄할 수 있는 침투성을 가지고 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 LID 시설의 하나인 레인가든에 대해 모니터링과 이에 대한 해석을 실시하였다. 본 연구의 결과를 통해 레인가든이 수용할 수 있는 적절한 불투수면적의 대략적인 추정이 가능하며, 이는 향후 도시 물 관리 문제를 해결하기 위한 의사결정 과정에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

하지만, 본 연구는 단 하나의 시범 지역을 통한 일회성 모니터링에 그쳤다는 점에서 한계를 가진다. 향후 다양한 시범 지역을 선정하여 양질의 모니터링 자료를 확보한다면, 보다 정밀한 모형 개발 및 일반화가 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(12기술혁신C03)에 의해 수행되었습니다.

References

- Balmori, D and Benoit, G (2007). *The Land and Natural Development (Land) Code: guidelines for sustainable land development*, John Wiley & Sonc Inc. Hoboken. New Jersey. pp.7-42.
- Dunnett, N. and Clayden, A (2007). *Rain gardens: Managing water sustainably in the garden and designed landscape*, Timber Press, Portland, pp. 41-61.
- Davis, AP, Shokouhian, M, Sharma, H and Minami, C (2001). Laboratory study of bioretention for urban stormwater management, *Water Environment Research*, 73(1), pp. 5-14.
- Dietz, ME and Clausen, JC (2005). A field evaluation of rain garden flow and pollutant treatment, *Water, Air, and Soil Pollution*, 167, pp. 123-138.
- Erickson, A, Gulliver, JS and Weiss, PT (2007). Enhanced sand for storm water phosphorous removal, *Journal of Environmental Engineering*, 133(5), pp. 485-497.
- Ferguson, BK and Suckling, PW (1990). Changing rainfall-runoff relationships in the urbanizing peach tree creek watershed, *J. of the American Water Resources Association*, 26(2), pp. 313-322.
- Hsieh, CH and Davis, AP (2005). Multiple-event study of bioretention for treatment of urban storm water runoff, *Water Science and Technology*, 51(3), pp. 77-181.
- Kim, JY, Lee, DK, Sung, SY and Park, C (2014). Sizing rain garden to reduce stormwater runoff in Hyoja drainage basin. *J. of Korea Planners Association*, 49(5), pp. 321-330. [Korean Literature]
- Kim, LH, Lee, SY and Min, KS (2008). The 21st Sustainable environmental policies for protecting the water quality and quatic ecosystems, *J. of wetlands research*, 10(2), pp. 53-66. [Korean Literature]
- Kim SM, Lee IS (2007). Environmentally friendly controlling way of storm water by using rain garden. *J. of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 10(5), pp. 58-66. [Korean Literature]
- Kim, YR, Kim, JY and Hwang, SH (2004). Application of stormwater detention facilities for lacking capacity of sewers. *J. of the Korean society of Water and Wastewater*, 18(3), pp. 343-350. [Korean Literature]
- KWRA (2009). *River Design Standard*, Korea Water Resources Association. [Korean Literature]
- KICT (2004). *21st Century Frontier R&D Program -Sustainable Water Resources Research Program- Technology for Rainwater Storage and Utilization*, Korea Institute of Construction Technology. [Korean Literature]
- KSWW (2005). *A study on management monitoring and operation for rainwater facility*, Korean Society of Water and Wastewater. [Korean Literature]
- Moon, GW, Yoo, JY and Kim, TW (2014). Comparing calculation techniques for effective rainfalls using NRCS-CN method: focused on introducing weighted average and slope-based CN, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, 34(4), pp. 1171-1180. [Korean Literature]
- NIDP (2001). *Study on the Storage and Infiltration Facilities for Reducing of Runoff Quantity(IV)*, National Disaster Management Institute.

- NEMA (2009). *Research on Optimization of Urban Flood Mitigation Facilities*, National Emergency Management Agency.
- NEMA (2010). *Type, Structure, Construction and Maintenance Standards of Stormwater Storage Facilities*, National Emergency Management Agency.
- Olson, RE and Daniel, DE (1981). Measurement of the hydraulic conductivity of fine-grained soils, *Permeability and groundwater contaminant transport*, American Society for Testing and Materials, 746, pp. 18-64.
- Park, C, Yoo, C, Shin, SY and Son, EJ (2013). Determining optimal volume and quantifying runoff reduction effects of on-site Stormwater detention facilities, *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 13(4), pp. 257-266. [Korean Literature]
- Park, CH, Yoo, C and Kim, JH (2005a). Revised AMC for the application of SCS method: 1. review of SCS method and problems in its application, *J. of Korea Water Resources Association*, 38(11), pp. 955-962. [Korean Literature]
- Park, CH, Yoo, C and Kim, JH (2005b). Sensitivity analysis of runoff curve number to the rainfall conditions, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, 26(6B), pp. 501-508. [Korean Literature]
- Perez-Pedini, C, Limbrunner, JF and Vogel, RM (2005). Optimal location of infiltration-based best management practices for storm water management, *J. of water resources planning and management*, 131(6), pp. 441-448.
- SDI (1995). *Control Measures for Urban Storm Runoff Reduction*, Seoul Development Institute. [Korean Literature]
- Song, JW and Im, JH (2007). An experimental study on runoff reducing effect of infiltration-storage system due to rainfall intensity, *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 7, No. 4, pp. 85-95. [Korean Literature]
- Suh, J and Lee, I (2013). The water circulation improvement of apartment complex by applying LID technologies, *J. of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 41(5), pp. 69. [Korean Literature]
- Wossink, GA and Hunt, WF (2003). *The economics of structural stormwater BMPs in North Carolina*, North Carolina Water Resource Research Institute, Raleigh.
- Yoo, C, Kim, K, Park, M and Yoon, J (2010). Quantification of flood reduction effect of small stormwater detention facilities by NRCS curve number, *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 10(3), pp. 109-118. [Korean Literature]
- Yoo, C, Park, CH and Kim, JH (2005). Revised AMC for the application of SCS method: 2- revised AMC, *J. of Korea Water Resources Association*, 38(11), pp. 963-972. [Korean Literature]
- Yoon, YN (2007). *Hydrology: Fundamental and application*, Cheong Moon Gak Publishers. [Korean Literature]