

## 비모수적 추계학적 일 강우 발생기 기반의 빗물이용시설 신뢰도 평가모형의 부산광역시 해운대 신시가지 적용

최치현 · 박무종\* · 백천우\*\* · 김상단†

부경대학교 환경공학과

\*한서대학교 토목공학과

\*\*서호주대학교 환경시스템공학과 & 생태수문학 센터

## Application of Rainwater Harvesting System Reliability Model Based on Non-parametric Stochastic Daily Rainfall Generator to Haundae District of Busan

ChiHyun Choi · MooJong Park\* · ChunWoo Baek\*\* · SangDan Kim†

Department of Environmental Engineering, PuKyong National University

\*Department of Civil Engineering, Hanseo University

\*\*School of Envir. Systems Eng. & Centre for Ecohydrogy, Univ. of Western Australia

(Received 18 May 2011, Revised 8 August 2011, Accepted 9 August 2011)

### Abstract

A newly developed rainwater harvesting (RWH) system reliability model is evaluated for roof area of buildings in Haeundae District of Busan. RWH system is used to supply water for toilet flushing, back garden irrigation, and air cooling. This model is portable because it is based on a non-parametric precipitation generation algorithm using a markov chain. Precipitation occurrence is simulated using transition probabilities derived for each day of the year based on the historical probability of wet and dry day state changes. Precipitation amounts are selected from a matrix of historical values within a moving 30 day window that is centered on the target day. Then, the reliability of RWH system is determined for catchment area and tank volume ranges using synthetic precipitation data. As a result, the synthetic rainfall data well reproduced the characteristics of precipitation in Busan. Also the reliabilities of RWH system for each of demands were computed to high values. Furthermore, for study area using the RWH system, reduction efficiencies for rooftop runoff inputs to the sewer system and potable water demand are evaluated for 23%, 53%, respectively.

**keywords** : Non-parametric stochastic rainfall generation algorithm, Potable water, Rainwater Harvesting System, Reliability

## 1. 서론

수자원관리시설은 도시화가 진행되면서부터 본격적으로 시작되었으며, 현재까지 꾸준한 관리가 이루어지고 있지만 끊임없는 도시성장 및 점점 더 급변하는 환경규정에 대처하기 위해 새로운 수자원관리시설의 건설이 필요하게 되었다. 도시 수자원관리시설의 기본 프로세스로는 상수도의 송수 및 배수, 하수처리시스템을 통한 처리 및 방류 등이 있으며, 이러한 작용은 총괄적인 도시계획에 따라 건설된 상·하수도시설에서 이루어진다.

그 밖의 다른 수자원 확보, 개간, 침투, 재사용 등 이러한 기술들을 가진 빗물이용시설은 지속적으로 수자원을 관리하기 위하여 실행 가능한 방법으로 설계가 고려되고 있으며, 수자원 관리를 위한 대안기술에는 녹색기반시설(Green Infrastructure: GI), 저영향개발(Low Impact Development:

LID), 지속가능한 도시배수시설(Urban Drainage Systems: SUDS), 강우유출수 원천제어(Stormwater Source Controls: SSCs) 등이 있다(Daigger, 2009). 이와 같은 대안기술시설들 중에서 빗물이용시설은 갈수지역의 용수공급대안으로 그 중요도가 증가하고 있으며, 용수공급능력 이외에도 도시 내에 각각의 소규모 배수구역에서 집수시설을 분산 설치하여 직접 유출되는 강우유출수를 줄이거나 재사용함으로써 수자원 관리에 효과적으로 적용될 수 있는 장점이 있다. 따라서 빗물이용시설을 이용한 수자원관리 방안은 지속적이고 효율적으로 도시 수자원을 관리할 수 있는 새로운 방안이 될 수 있을 것이다.

20세기 후반에 아프리카, 아시아, 남미에서의 인구 및 도시 성장에 따라 필요한 물을 충당하기 위해 빗물이 이용되었으며(Lee et al., 2000), 빗물이용사례는 전 세계적으로 다양하게 보고되고 있다(Cowden et al., 2008). 최근 다양한 모형들을 이용하여 빗물이용시설이 평가되고 있지만 이러한 연구의 궁극적인 목적은 수자원확보 및 관리에 있다. 예를 들어, Ghisis (2006)는 브라질 남동부 지역에 빗물이

† To whom correspondence should be addressed.

skim@pknu.ac.kr

용시설을 설치하였을 경우 지역에 따라 48~100%까지 생활용수가 감소될 수 있다는 것을 평가하였다. 주거지의 빗물 이용시설 공법이 1980년대 초에 부각된 독일에 Hermann and Schmida (1999)는 화장실용수 공급에 이용되는 4~6 m<sup>3</sup> 탱크를 가진 빗물이용시설을 설치하여 평균적으로 30~60%의 생활용수가 줄어드는 것을 평가하였다. Coombes 등 (1999)은 Newcastle, New South, Wales, Australia에 빗물 이용시설을 고려한 도시 재개발 사업을 통해 강우유출수를 저감하면서 약 60%의 생활용수를 줄일 수 있다고 평가하였다. Zhang 등(2009)은 매우 높은 인구밀도를 가진 베이징에서 화장실용수 공급에 사용되는 빗물은 생활용수 소비를 25% 가량 줄일 수 있다는 것을 확인하였다. 도시 뿐만 아니라 농촌에서도 농작물 수확에 큰 영향을 주는 건기 동안에 사용되는 농업용수를 확보하기 위한 방안으로 빗물 이용시설이 사용되고 있으며(Fox et al., 2005), 이러한 지역에서의 빗물이용시설은 물과 식량을 확보하기 위한 중요한 수단이 될 것이다.

국내에서도 대한상하수도학회(2003)의 ‘빗물이용시설 보급 확대를 위한 정책방안 연구’에서 빗물이용과 관련하여 다양한 추가 연구의 필요성이 제시되었으며, 서울시정발연구원(2003), 농림부(2003), 과학기술부(2004)와 같은 연구기관에서도 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 유철상 등(2008)은 빗물이용시설을 이용한 장기유출모형을 구축하여 홍수 유출량 저감 영향을 평가하였으며, 강원구 등(2010)은 서울대학교 건물을 대상으로 확률적인 개념이 적용된 시간의 연속성에 따른 저류용량과 부족량 관계를 규명하고 지속가능한 빗물이용시설을 위한 저류용량을 산정하여 화장실용수 이용 저감영향을 평가하였다.

본 연구의 목적은 빗물이용시설의 신뢰도를 평가하는 Storage and Reliability Estimation Tool (SARET)을 소개하고(Basinger et al., 2010), 이를 부산광역시 해운대 신시가지에 적용하여 모형을 평가하는 것이다. 빗물이용시설의 신뢰도는 적용지역의 강우특성, 저장탱크용량, 배수면적, 그리고 수요특성 및 수요량 관계에 의해 결정된다. 이때 저장탱크에 저장된 물의 양이 수요량을 충족하지 못할 경우에 빗물이용시설을 이용할 수 없게 된다. 이러한 사상을 특정 설계기간으로 나누어주게 되면 빗물이용시설의 신뢰도가 산정된다. 또한 SARET는 적용지역에서 관측된 강우량을 고려하여 저장탱크용적 및 배수면적 범위에 대한 신뢰도 곡선을 산정할 수 있다. 특히 이 모형은 비모수적 강우발생기를 이용하기 때문에 간편하고 효율적으로 사용가능할 것이다.

본 연구에서는 먼저 빗물이용시설의 설계에 관한 설명을 하고, 다음으로 SARET를 상세하게 설명하였다. 그리고 마지막으로 해운대 신시가지에 빗물이용시설을 설치할 경우 빗물이용시설에 대한 신뢰도를 평가하였다. 이때 집수된 물의 용도는 화장실용수, 관개용수, 에어컨냉각용수 세 가지로 나누었으며, 추가적으로 신뢰도의 계절 변동성과 해운대 신시가지의 적용지역에 빗물이용시설이 설치되었을 경우 강우유출수와 수돗물 사용의 연간 저감효율을 평가하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 빗물이용시설 설계 방법

빗물이용시설은 적용방법에 따라 다양한 설계를 할 수 있으며, 장기간의 강우자료와 물수지분석을 이용한 신뢰도 분석은 빗물이용시설의 설계에 있어 대표적인 방법이다. 물수지 분석에 있어 가장 중요한 영향을 갖는 인자로는 강우자료가 있으며, 강우자료는 다양한 강우발생기법에 의해 획득이 가능하다. 그 중 연강우량의 변동성만을 고려하는 것이 가장 간단한 방법일 것이다(Gould and Nissen Petersen, 1999). 하지만 이러한 방법의 문제점은 불분명한 강우분포에 기초하여 설계된다는 점에 있다. 예를 들어 우리나라의 부산과 호주의 시드니 지역은 계절적/시간적으로 매우 다른 강우분포를 가지지만 연강우량 값은 매우 유사한 강우특성을 가진다. 이러한 강우특성이 고려되지 않는다면 두 도시의 빗물이용시설의 신뢰도는 유사하게 산정될 것이다. 하지만 이러한 결과는 두 도시의 강우분포가 매우 상이하기 때문에 오류를 범할 가능성이 크다. 좀 더 복잡한 빗물 이용시설 설계방법은 확률 분포를 이용하여 식을 유도하거나 장기간 관측 강우자료를 사용하는 것이 있다. 그 예로서 Su 등(2009)은 대만의 어떤 도시에 화장실용수공급을 위한 빗물이용시설 설계를 위해 저장용량과 용수 부족률 관계식을 유도하기 위해 50년 관측강우기록을 이용하였다. 이러한 방법은 강우특성을 잘 재현하고 특정 지역에 대해 적용하기에는 유용하지만 특정 강우기록에 따라 고유한 매개변수 산정하여야 하므로 다른 지역에 대한 적용이 어렵거나 아예 불가능하다는 단점이 있다.

이러한 이유로 인하여 통계적 강우발생기를 이용하는 빗물이용시설 설계기법이 연구되어 왔다. 다양한 지역의 모델 적용성은 강우발생 알고리즘의 성능에 달려있다. 강우발생 알고리즘은 지역이 가지는 강우특성을 재현하기 위해 종합적인 확률 변수들을 산정한다. 하지만 이러한 모형들이 유용하게 사용된다면 계산절차가 확실하고, 간편하여야 한다(Sharma and Lall, 1999).

통계적 강우발생기는 일반적으로 모수적(parametric) 방법과 비모수적(non-parametric) 방법으로 나뉜다. 위에서 설명된 통계적 방법들은 모수적 방법이다. 모수적 방법으로 강우특성을 설명하려면 지역의 고유한 통계적 관계가 정의되어야 한다. 또한 모형에 입력되는 통계적 매개변수들은 한 지점에 초점을 맞추어 산정되므로 다른 지역에 대한 적용성이 매우 낮다는 단점을 가지고 있다. 예를 들어 Guo and Baetz (2007)는 모수적 방법을 이용하여 특정 도시의 용수량에 따른 신뢰도가 충족되는 빗물이용시스템을 설계하였다. 이 방법은 시카고와 피닉스에 강우사상별 강우량과 지속시간의 특성을 정의하기 위해 1변수 지수분포를 적용하였으며, 이들의 적합도를 평가하기 위해서는 Kolmogorov-Smirnov 검정법을 수행하였다. 이후 IETD (Inter-event time duration)가 지수적으로 분포된다는 가정 하에 포아송 과정에 따라 합성 강우시계열을 모의하였다. 그리고 이러한 합성 강우자료를 토대로 특정 도시용수와 신뢰도의 관계함수

를 정의하였으며 빗물이용시설을 직접설계할 수 있도록 하였다. 이러한 방법은 비교적 간단하지만 강우량이 지수적으로 분포된다는 가정에 의해 좌우되고, 또한 계절적인 변동성을 고려하지 않기 때문에 결과의 정확성을 보장받을 수 없다. 이에 Basinger 등(2010)은 다른 지역에도 Guo and Baez (2007)가 설계한 모형이 적용될 수 있는지에 대해 평가해보았다. 뉴욕시의 1978~2002년 관측 일 강우 자료를 사용하여 강우량 분포가 지수함수를 따르는 지에 대해 먼저 평가해 보았다. Kolmogorov-Smirnov와 Anderson-Darling 검정법을 통하여 뉴욕시의 강우량 분포는 지수분포를 따르지 않는다는 증거를 제공하였다. 또한 확률적인 방법으로 계절변동성을 평가하기위해서 동일한 강우자료를 이용하였다. 이에 뉴욕시는 계절 변동성이 존재한다는 결과가 밝혀졌다. 이러한 점을 미루어 보았을 때 모수적 방법을 이용한 강우발생기는 지역 한계성을 드러내고 있음을 알 수 있다(Rajagopalan et al., 1997).

통계적 강우발생기의 또 다른 방법은 비모수적 방법이다. 이 방법은 강우량의 확률분포형에 대한 선행적 전제가 필요하지 않으며 강우발생을 설명하기위해서 마코프 연쇄를 사용하게 된다. 건기일과 우기일의 순차적인 진행에 따라 강우발생을 정의하며, 과거 자료를 통하여 강우량을 모의한다(Lall et al., 1996). 이 때, Kernel 추정량, Moving Windows, 또는 최근접이웃방법(nearest neighbor approach) 등을 사용하여 이전의 강우상태를 기반으로 미래의 강우상태를 정의하는 방식으로 계절적 변동성이 고려된다(Lall and Sharma, 1996; Lall et al., 1996; Sharma and Lall, 1999). 이러한 강우발생기는 지역에 무관하게 동일한 강우발생알고리즘을 사용하므로 어느 지역의 강우기록에도 적용될 수 있는 장점이 있다.

서아프리카 도시에서 1인당 하루에 최소 20 L를 산출할 수 있는 저장탱크가 없는 가정용 빗물이용시설을 설계한 Cowden 등(2008)은 비모수적 강우모의방법이 적용된 빗물이용시설 설계를 수행하였다. 그리고 각각 손실일이 평균 22%인 최소 20년 장기간 강우자료를 이용하여 비모수적 방법인 LARS-WG 모형(nonparametric spell length model)과 준모수적 방법인 마코프 모형의 성능비교를 하였다. Markov 모형은 준모수적이기 때문에 관측 자료로부터 유도된 전이확률을 사용하여 강우발생을 비모수적으로 유도하였으며, 감마 그리고 혼합지수함수로 강우량을 산정하였다. 또한 0차, 1차, 2차 Markov 발생 모형을 각각 시험하였다. 이러한 수행에 따라 비모수적 방법인 LARS-WG 모델이 준모수적 방법인 마코프 모형보다 강우특성을 보다 잘 재현하며, 계절 변동성 또한 고려되어 비모수적 방법의 강우발생기의 이점을 증명한 바 있다.

그러나 강우를 모의 발생할 경우 모수적 방법과 비모수적 방법 중 어떤 것이 보다 좋은 방법인가의 문제는 본 연구에서 다룰 사항은 아닌 것으로 판단된다. 다만, 본 연구의 경우에는 연구 목적 상 비모수적 방법이 보다 적용에 유리한 측면이 있기 때문에 적용한 것이며, 모수적 방법 또한 상황에 따라서는 비모수적 방법보다 더 적절하게 적용될 수 있을 것이다. 또한 모형의 적용은 모형의 기본적

인 이론 또한 적용에 있어 중요한 사항이지만, 아울러서 모형을 적용하는 사람의 모형에 대한 지식 정도가 오히려 더 중요한 경우가 있는 것도 사실이다.

## 2.2. SARET 소개

SARET는 상기 서술된 모형들의 대안으로 제시된 모형이다. SARET는 완전한 비모수적 강우발생기를 사용하여 빗물이용시설을 설계하며, 도시에서 다양하게 사용되는 용수의 수요량을 충족시킬 수 있는 기준인 신뢰도를 산정한다. 이 모형은 Basinger 등(2010)의 연구를 참고하였으며, 장기간 관측자료를 이용하여 Matlab으로 구현하였다. Fig. 1에서는 SARET의 흐름도를 도시하였다. 비모수강우발생기는 사용자가 관측강우자료를 입력하면, 입력 자료로부터 발생된 Markov chain의 전이확률이 산정된다. 다음으로 배수면적, 탱크용적, 수요특성, 수요량, 초기스플림특성을 지정해 주면 적용지역의 강우특성이 고려되어 빗물이용시설 탱크의 저장용량이 계산되고 이에 따른 신뢰도 또한 산정된다. 여기에서는 비모수적 방법을 사용한 합성강우시계열과 신뢰도 산정방법에 대해 구체적으로 설명하고자 한다.

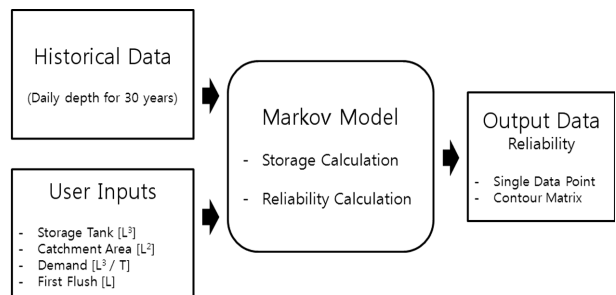


Fig. 1. Schematic diagram of the SARET.

### 2.2.1. 비모수적 방법을 사용한 합성 강우 시계열 산정

일 관측 강우자료로부터 강우발생확률과 강우량을 산정할 수 있으며, 이는 Apipattanavis 등(2007)의 연구방법과 유사하게 적용되었다. 합성강우시계열을 산정하기위한 비모수적 강우발생기 알고리즘 매개변수를 Table 1에 정리하였다. 먼저 강우발생의 통계적 특성을 정의하기위해 관측 자료에서 비가 온 날을 “wet(강우량 값이 양수)”, 비가오지 않은 날을 “dry(강우량 값이 0)”로 구분한 배열을 연속적으로 산정하였다. 이후 해당기간에 포함된 모든 연도에 대해 각 일을 기준으로 설정하고, 기준일 이전 15일과 기준일 이후 14일에 포함된 강우량(30일 강우량)을 가지며, 기준일의 강우량이 중심에 위치하는 강우량 배열을 산정한다. 이때 첫 해의 배열에 필요한 강우량은 마지막 해에서, 마지막 해의 열에 필요한 강우량은 첫해에서 획득된다. 강우량 배열에서 연도별 같은 날짜를 가지는 각각의 배열을 서로 연결시켜 하나의 배열(30days × Number of years)로 다시 정렬 시킨다. 30년 강우자료를 이용하는 본 연구의 경우 날짜별로 900일의 강우량이 포함된다. 즉, 30년 동안에 날짜가 1월 1일은 30일 존재하며, 일별 30일 강우량을 가지고 있으므로 각 날짜별로 900개의 강우량이 포함된다. 이

900개의 강우량을 가지는 배열에 따라 SARET는 각 날짜별  $P_i(W)$ ,  $P_i(WW)$ ,  $P_i(WD)$ ,  $P_i(DD)$ ,  $P_i(DW)$ 을 계산한다(식 (1)~(5) 및 Table 1 참조). 이러한 1차 마코프 연쇄과정을 통해 모든 날짜( $i$ )에 따른 강우발생에 대한 계절 변동성이 고려되도록 하였다.

$$P_i(W) = \frac{W}{W+D} \quad (1)$$

$$P_i(WW) = \frac{WW}{WW+WD} \quad (2)$$

$$P_i(WD) = 1 - P(WW) \quad (3)$$

$$P_i(DD) = \frac{DD}{DD+DW} \quad (4)$$

$$P_i(DW) = 1 - P(DD) \quad (5)$$

SARET는 상기 다섯 개의 식으로 계산된 확률을 사용하여 합성강우발생 여부 시계열을 모의한다. 이때 합성강우발생 여부 시계열의 발생일시가 먼저 고려되어 관측 자료의 기간과 일치하도록 설정한다. 이후 해당 날짜에 대한 균등 난수( $R_{(i)}$ )를 두 번 발생시키며, 첫 번째 난수( $R_{o(i)}$ , Rain occurrence)는 강우의 발생여부를, 두 번째 난수( $R_{a(i)}$ , Rain amount)는 강우발생일의 강우량을 결정하도록 설정하였다.

본 연구와 같이 해당기간이 30년이며, 각 날짜별로 900일의 강우량이 포함한다고 가정하고 자세히 설명하면, 첫날의 경우 강우발생확률은  $P_1(W)$ 을 따르며,  $R_{o(1)}$ 가  $P_1(W)$ 보다 작을 경우 모의 첫 날은 강우가 발생되며, 클 경우에는 강우가 발생되지 않는다. 첫 날에 강우가 발생된다면  $R_{a(1)}$ 에 900일의 강우량 배열에서 0 보다 큰 날의 전체 일수를 곱하고 반올림 한다. 0 보다 큰 강우량 값 중에서 이에 상응하는 순서의 강우량을 추출하여 첫 날의 강우량으로 선정한다. 강우가 발생하지 않을 때에는 강우량 값을 0으로 설정한다. 두 번째 날부터는 전날의 강우발생여부를

고려하여 전날에 강우가 발생하였다면  $P_i(WW)$ 를, 전날에 강우가 발생하지 않으면  $P_i(DD)$ 를 이용하여 강우발생 여부를 판단하고 첫날과 같은 방법으로 강우량을 연속적으로 추출하면 첫 번째 시나리오의 합성강우시계열이 발생된다. 이러한 실행을 100번 반복하여 100개의 합성강우시계열이 발생된다. 실행횟수는 설정이 가능하다.

## 2.2.2. 빗물이용시설 규모 및 신뢰도 계산

SARET는 합성강우시계열을 발생시킨 이후에 비모수적 강우발생기를 이용하여 설치된 빗물이용시설이 수요량을 얼마나 충족할 수 있는지 평가하기 위해 배수면적과 저장용적 범위에 대한 신뢰도 곡선을 산정한다. 이때 SARET는 사용자가 배수면적, 저장용적, 초기쓸림특성(초기쓸림이 발생하는 최소 건조기간) 및 초기쓸림량, 수요특성에 따른 수요량을 직접 입력할 수 있게 구성되어 있다. 그리고 배수면적과 저장용적이 단일 값 또는 범위로 입력되면 신뢰도 또한 단일 값 또는 범위에 대한 행렬로 각각 산정될 수 있다.

빗물이용시설의 저장탱크에 물의 양은 식 (6)을 이용하여 일별로 계산한다.

$$S_i = \begin{cases} 0 & \text{if } S^* < 0 \\ S^* & \text{if } 0 \leq S^* \leq S_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

$$S_{\max} \quad \text{if } S^* \geq S_{\max}$$

$$S^* = S_{i-1} + (A \times \text{Max}[0, P_i - FF]) - D_i$$

여기서,  $S_i$ 는 “ $i$ ”날의 마지막 시점에 저장탱크에 남아있는 물의 양 [ $L^3$ ]

$S_{i-1}$ 는 “ $i-1$ ”날의 마지막 시점에 저장탱크에 남아있는 물의 양 [ $L^3$ ]

$A$ 는 배수면적 [ $L^2$ ]

$P_i$ 는 “ $i$ ”의 강우량 [ $L$ ]

$FF$ 는 초기 쓸림량 [ $L$ ]

$D_i$ 는 “ $i$ ”날의 빗물 수요량 [ $L^3/T$ ]

$S_{\max}$ 는 저장탱크용량 [ $L^3$ ]

**Table 1.** Description of parameters used in the nonparametric rainfall generation algorithm

Symbol	Description
$W$	Number of wet days
$D$	Number of dry days
$WW$	Number of wet following wet days
$WD$	Number of dry following wet days
$DD$	Number of dry following dry days
$DW$	Number of wet following dry days
$P_i(W)$	Probability of a wet day for day “ $i$ ”
$P_i(WW)$	Probability that day “ $i$ ” will be wet, given day “ $i-1$ ” was wet
$P_i(WD)$	Probability that day “ $i$ ” will be dry, given day “ $i-1$ ” was wet
$P_i(DD)$	Probability that day “ $i$ ” will be dry, given day “ $i-1$ ” was dry
$P_i(DW)$	Probability that day “ $i$ ” will be wet, given day “ $i-1$ ” was dry

SARET는 사용자가 하루에 사용되는 수요량(예를 들면 100 L/day)을 선정할 수 있을 뿐만 아니라 월별로 수요량 값을 변경하여 다양하게 적용될 수 있다. 게다가 화장실 용수처럼 매일 수요량이 발생하는 방식, 관개용수처럼 비가 오지 않는 경우 발생하는 방식 그리고 이 두 가지 방식의 조합에 대해서도 고려할 수 있다.

그리고 모형 적용 시 초기צל림특성을 고려해 주어야 한다. 즉 초기צל림이 발생되기 위한 최소한의 무 강우 지속 일(x-day)을 설정해야한다. 본 연구에서는 x 값으로 3일을 선정하였으며, 이 값은 탁도 실험에서 3일 이상 무 강우일이 지속될 경우 수질이 악화된다는 연구결과를 참고하였다(Martinson and Thomas, 2005).

배수면적을 특정 값으로 지정하고 사용자가 지정한 수요량과 신뢰도를 만족하는 저장용적 크기가 산정되는 모형 적용에서 SARET는 장기간 모의된 강우를 고려하여 사용자가 지정한 수요량을 만족하는 최대 저장용적을 계산한다. 이러한 절차는 100번 반복되며, 실행횟수는 설정이 가능하다.

사용자가 지정한 배수면적, 저장용적, 수요량에 따라 설계된 빗물이용시설의 신뢰도는 다음과 같이 계산된다. 먼저 해당기간(30년)에 걸쳐 저장탱크의 용수가 수요량을 만족하지 못하는 날의 수를 센다. 이러한 사상을 “failures”라 정의한다. 다음으로 “failures”의 수를 해당기간의 총 일로 나누어 주면 빗물이용시설의 신뢰도가 산정된다.

### 3. 결과 및 고찰

SARET는 지역에 제한받지 않고 빗물이용시설의 신뢰도를 평가할 수 있으며, 빗물이용시설을 적용하기 위해서는 주거지, 상가 등 건물이 많이 밀집되어있는 곳이 적당하다. 이러한 점들을 고려하여 본 연구에서는 부산광역시 해운대구 좌동(해운대 신시가지)을 적용대상지역으로 선정하고, SARET를 사용하여 빗물이용시설의 신뢰도를 평가하고자 하였다. 해운대 신시가지는 해운대 해수욕장의 동북쪽 장산의 남쪽에 위치한 신시가지로 많은 아파트와 상가들이 밀집한 지역으로 부산광역시 최초의 계획도시이며 장산역을 중심으로 원형으로 동그란 형태로 시가지가 늘어서 있는 특징을 가지고 있다.

#### 3.1. 부산광역시 강우자료

SARET를 사용하기 위해서는 먼저 관측 강우자료가 필요하다. 부산지역의 강우특성에 영향을 받는 해운대 신시가지의 강우자료는 기상청 부산지점의 1980년부터 2009년도에 해당하는 30년간 일 강우량을 이용하였다. 이 지역의 강우 특성으로 연평균 강우량은 1,533 mm (Fig. 2), 연강우량에 대한 표준편차는 419.5 mm이다. 연간 강수일 확률은 약 33%가 최대, 약 18%가 최소, 그리고 평균적으로는 약 27%로 나타난다(Fig. 3). 30년 동안 일강수량을 분석하였을 때 강수량이 작을수록 빈도가 많이 발생하였으며, 10 mm 이하의 강우가 전체의 약 85%를 차지하는 것으로 파악되었다(Fig. 4). 그리고 대상지역의 강우변동성을 보여주는 월

강우량 특성을 상자수염도로 제시하였다(Fig. 5). 우리나라는 강우가 여름철에 집중된다. 이 그림에서도 다른 달보다

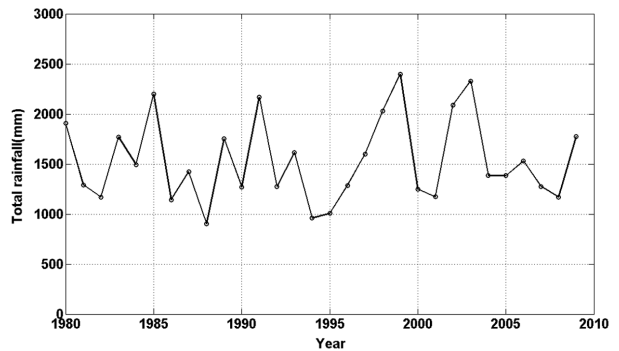


Fig. 2. Annual precipitation in Busan 1980-2009.

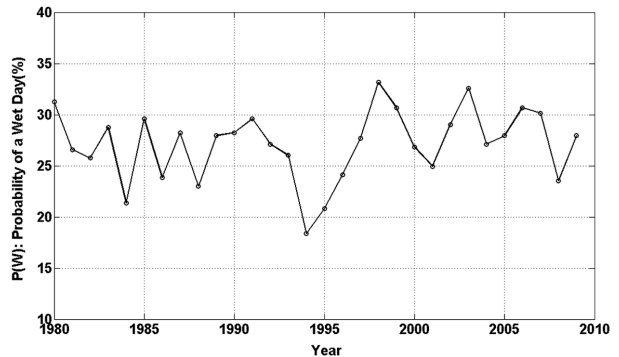


Fig. 3. Probability of wet day in Busan 1980-2009.

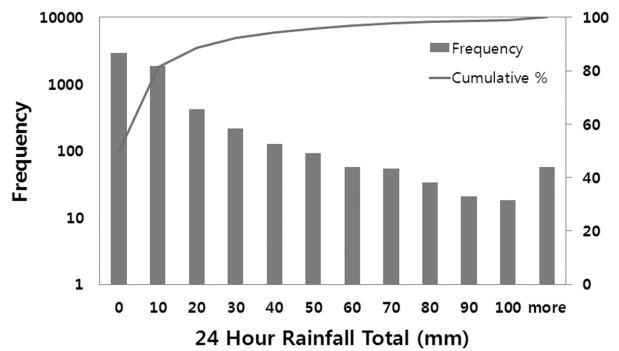


Fig. 4. Histogram of daily precipitation amounts in Busan, 1980-2009.

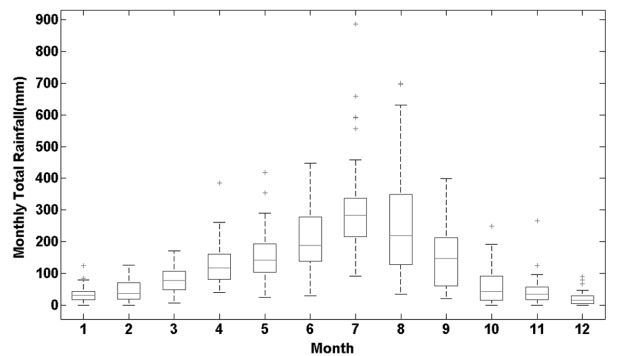


Fig. 5. Box and whisker plot depicting variability in monthly precipitation in Busan.

6-9월에 강우가 집중되는 것을 확인할 수 있다. 강우변동성을 설명하는 30년간 월강우량의 평균 및 표준편차, 월무강우 일수의 평균과 표준편차에 대한 그림을 모의된 자료와 더불어 추가로 제시하였다(Fig. 6-9).

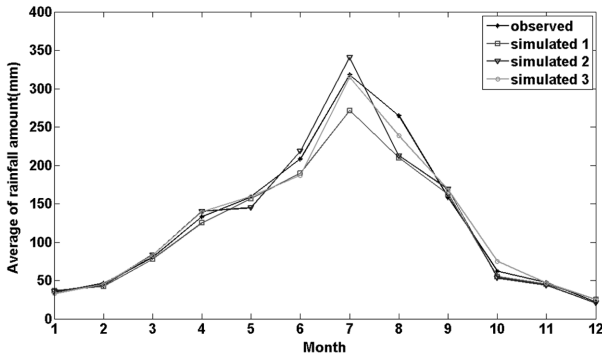


Fig. 6. Monthly average of rainfall amount.

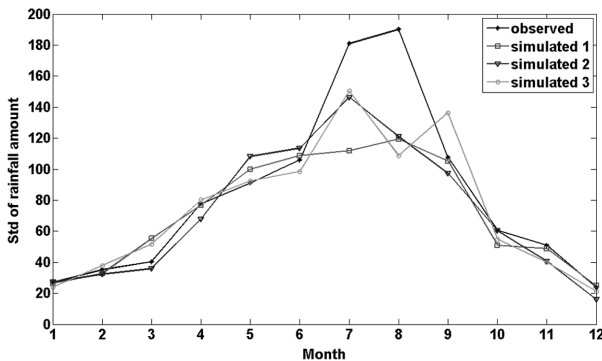


Fig. 7. Monthly standard deviation of rainfall amount.

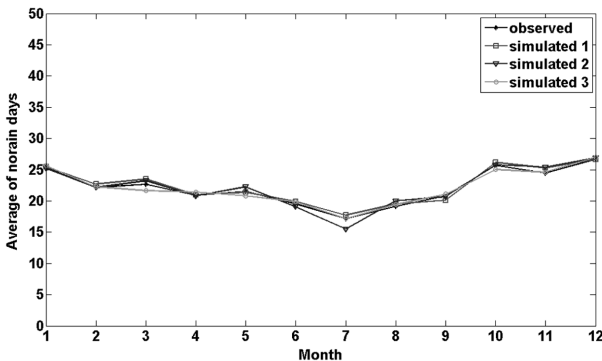


Fig. 8. Monthly average of norain days.

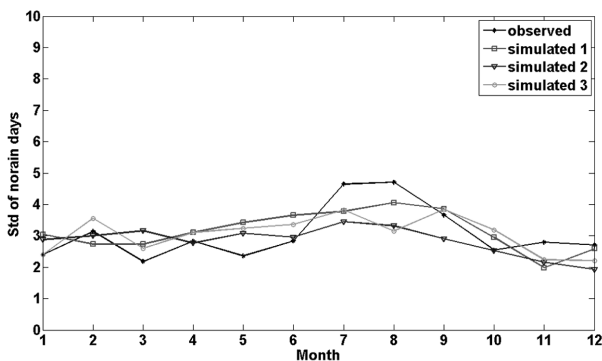


Fig. 9. Monthly standard deviation of norain days.

비모수적 방법으로 발생된 30년간 100개의 합성 강우자료와 관측 강우자료의 특성을 비교하기 위해 각각의 합성 강우자료에 대한 월평균 강우량을 100개씩 산정하여 이를 상자수염도로 나타내었다(Fig. 10). 합성 강우자료에 대한 월평균 강우량을 나타내는 Fig. 10과 관측 강우자료에 대한 월평균 강우량을 나타내는 Fig. 6를 비교하면 합성 월평균 강우량의 중앙값이 관측 월평균 강우량과 거의 유사한 것을 파악할 수 있다. 또한 합성 강우자료에 대한 월강우량의 표준편차를 나타내는 Fig. 11은 관측 강우자료에 대한 월강우량의 표준편차를 나타내는 Fig. 7과 비슷한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 그리고 합성 강우자료에서도 관측 자료와 같이 계절성을 잘 재현하고 있다.

이번에는 100개의 합성 일 강우자료 중 세 개를 임의로 선택하여 부산지점의 30년간 관측 일 강우자료와 통계적으로 비교해 보았다. 이때 관측 일 강우자료를 “observed”, 합성 일 강우자료를 “simulated 1”, “simulated 2”, “simulated 3”로 각각 설정하였다. 연평균 강우량의 경우 관측 자료의 중앙값은 비슷한 경향을 보이고 있으나 최소 및 최대값의 분포가 다소 다양하게 나타나고 있으며, 모형의 특성 상 극한 강수량의 재현은 적용된 모형의 한계인 것을 살펴볼 수 있다(Fig. 12). 그러나 빗물이용시설은 극한 강수량 시작되는 것이 아니라 주로 일반적인 강우량이 발생할 때를 대상으로 설계가 되므로 이러한 극한 값이 빗물이용시설의 신뢰도 평가에 미치는 영향은 비교적 작을 것으로 판단된다. 따라서 빗물이용시설의 신뢰도에 보다 큰 영향을

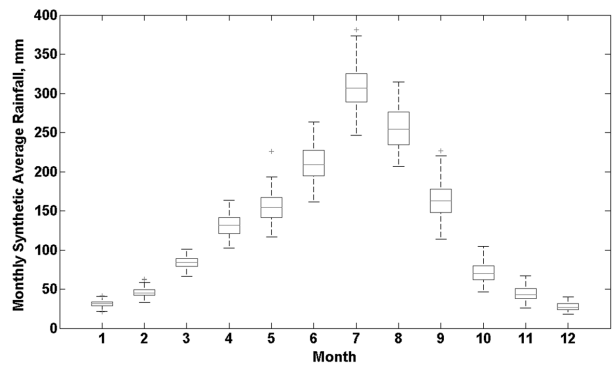


Fig. 10. Box and whisker plot depicting variability in monthly synthetic average precipitation in Busan.

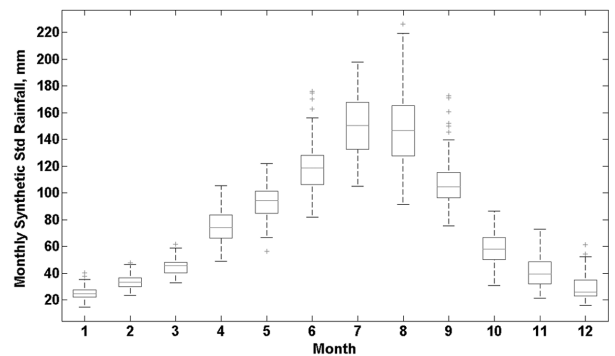


Fig. 11. Box and whisker plot depicting variability in monthly synthetic standard deviation precipitation.

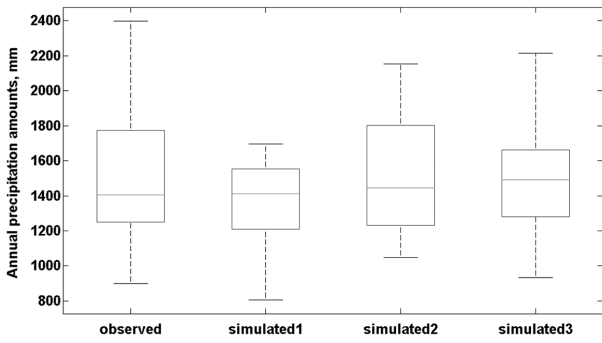


Fig. 12. Box and whisker plot comparing historical and synthetic annual precipitation amounts for 1980-2009.

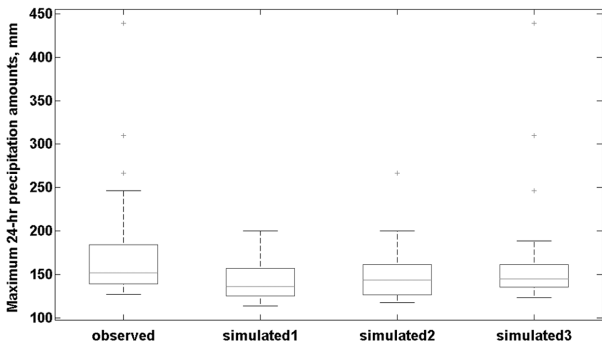


Fig. 13. Box and whisker plot comparing the historical and synthetic 24-hour precipitation amounts (30 highest values) for 1980-2009.

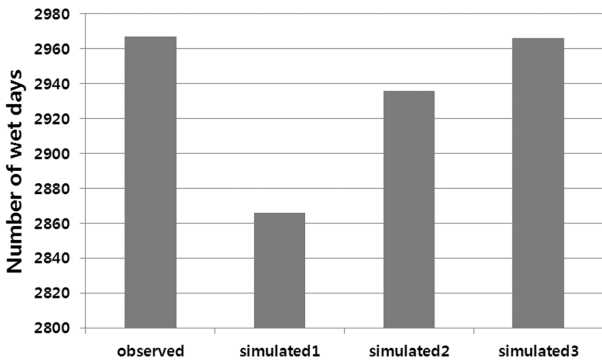


Fig. 14. Column chart depicting the number of wet days in the historical and synthetic sequences of 1980-2009.

미치는 관측 자료에서 가장 큰 30개의 일 강우량과 각 합성자료에서 가장 큰 일강우량 30개를 비교하였다. 관측 자료의 사분위 범위, 중앙값, 극값이 합성자료의 값과 유사한 경향을 보임을 살펴볼 수 있다(Fig. 13). 연간 강우 발생일의 경우 관측 자료의 강우 발생일은 연간 98.9일이며 합성 자료의 강우 발생일은 연간 95.53, 97.87, 98.89일로 매우 유사한 결과를 보여준다(Fig. 14). 또한 강우사상 사이에 강우가 발생하지 않는 기간(무강우기간)에 대한 빈도분석을 하였다. 그 결과 관측 자료와 합성자료가 비슷한 결과를 보이고 있으며, 무강우기간이 15일 이상이면 매우 낮은 빈도를 가지는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 15). 마지막으로  $P_i(WW)$ ,  $P_i(WD)$ ,  $P_i(DD)$ ,  $P_i(DW)$ 를 비교해 보았다.

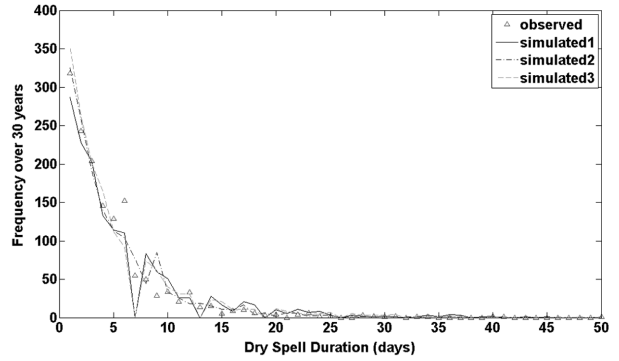


Fig. 15. Comparison of the frequency of dry spells of different durations in the synthetic precipitation series to the historical observations.

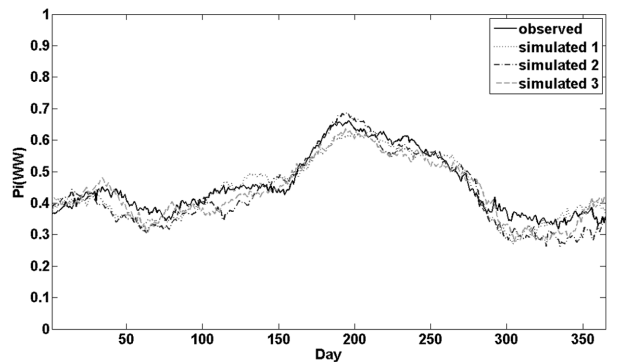


Fig. 16. Probability that day "i" will be wet, given day "i-1" was wet.

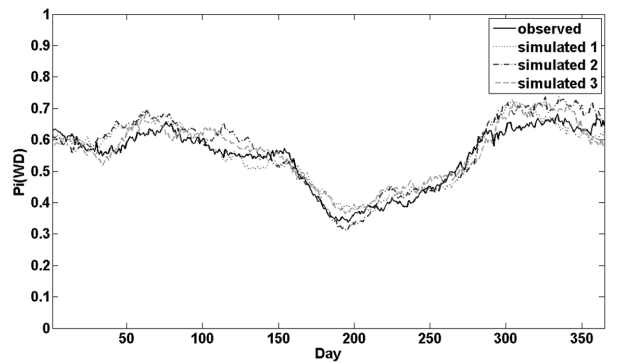


Fig. 17. Probability that day "i" will be dry, given day "i-1" was wet.

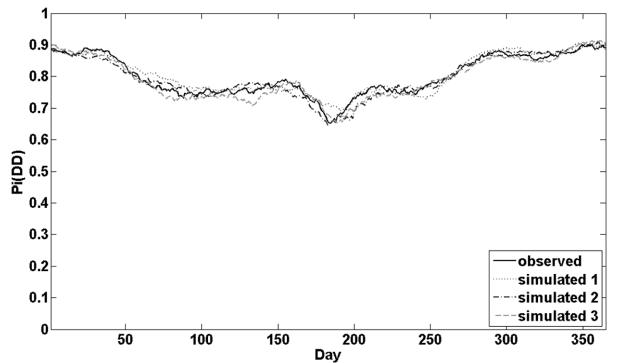


Fig. 18. Probability that day "i" will be dry, given day "i-1" was dry.

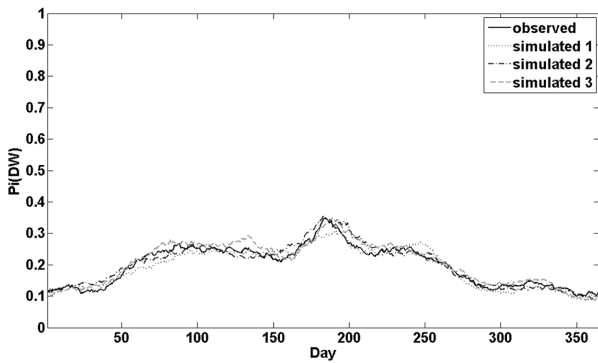


Fig. 19. Probability that day “i” will be wet, given day “i-1” was dry.

네 가지 확률 모두 관측 자료의 경향을 잘 재현하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 16~19). 위에서 제시된 Fig. 6-19의 결과들을 보면 합성 자료가 관측 자료의 강우특성을 잘 재현하고 있다. 이 결과를 바탕으로 SARET에서 사용되는 비모수적 강우발생기는 관측자료를 우수하게 재현하고 있음을 살펴볼 수 있다.

### 3.2. SARET 모형에 적용되는 매개변수 범위 선정

SARET 모형을 사용하려면 사용자는 먼저 모형에 적용되는 매개변수 값 또는 범위를 입력해 주어야 한다. 매개변수에는 지붕면적, 빗물이용시설 탱크 용적, 초기쓸림특성, 수요특성에 대한 수요량이 있다. 여기서는 해운대 신시가지에 적용될 수 있는 매개변수의 선정절차에 대해 설명하고자 한다. 이 매개변수들은 Table 2에 정리하였다.

#### 3.2.1. 지붕면적 및 저장탱크용적 범위

미국 뉴욕시에서는 도시계획을 위해 구축된 PLUTOTM (The Primary Land Use Tax Lot Output)를 사용하여 빗물 이용탱크를 설치할 수 있는 지붕면적 자료가 이미 구축되어 있다. 하지만 국내의 경우, 미국과 같은 자료구축은 현실상 미비한 수준이거나 수행되지 않고 있기 때문에 본 연구에서는 각종 웹에서 제공하는 항공사진을 통해 빗물이용탱크를 설치할 수 있는 지붕면적 자료를 직접 구축하였다. 지붕면적 범위를 선정하기위해 구축된 자료를 이용하여 빈도분석을 실시하였다(Fig. 20). 해운대 신시가지의 건물의 지붕면적 중에 1~175 m<sup>2</sup>가 조사된 전체 지붕면적의 약 80%를 차지하고 있으며, 이는 미국 뉴욕시의 건물지붕면적의 빈도분포(Basinger et al., 2010)와도 유사한 경향을 나타

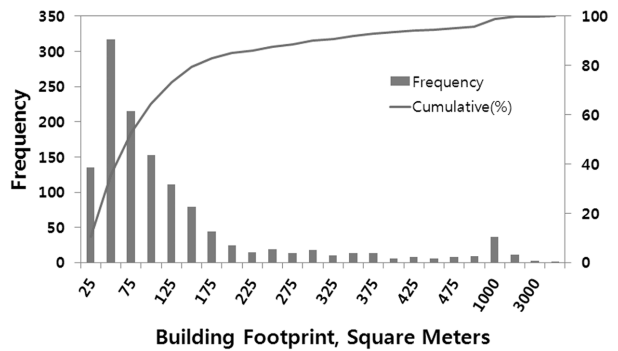


Fig. 20. Building footprint histogram for Haeundae new town, square meter.

내는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 빗물 이용시설이 설치되는 지붕면적을 1~180 m<sup>2</sup> 범위로 설정하는 것이 적합하다고 판단하였다.

현재 빗물이용시설에 실제로 사용되는 저장탱크의 용적은 2~56 m<sup>3</sup>이며(Texas water Development, 2005), 이 범위를 초과하는 저장탱크는 지상에 설치되거나 지하에 매립된다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 저장탱크 용적의 범위를 1~60 m<sup>3</sup>로 설정하였다.

#### 3.2.2. 초기쓸림특성

일정한 기간 동안 지붕에 강우가 발생하지 않으면 낙엽, 꽃가루, 나뭇가지, 벌레, 동물의 배설물, 살충제 및 기타 대기의 잔류물 등과 같은 먼지들이 쌓이게 된다. 이때 강우가 발생하게 되면 빗물에 이러한 오염물질들이 포함되어 수질이 악화된 상태로 저장탱크에 유입될 수 있기 때문에 빗물이용시설의 용수로 부적합하게 된다. 그러므로 SARET에서는 초기쓸림특성을 고려하여 빗물이용시설의 용수에 적합한 수질을 유지하고자 하였다.

앞서 언급했듯이 3일 이상 무 강우일이 지속될 경우 초기 쓸림이 발생되며(Martinson and Thomas, 2005), 초기쓸림의 영향을 고려하기위한 장치로는 초기쓸림분배기(First flush diverter)를 이용할 수 있다. 이는 배수면적에서 초기에 발생한 오염된 빗물을 다른 저장탱크에 집수하는 장치로 Texas Water Development (2005)는 100 ft<sup>2</sup>인 배수면적에서 하루에 1~2 gallons의 초기쓸림량(초기 강우의 0.4~0.8 mm)을 제어할 수 있는 초기쓸림 분배기가 추천되고 있다.

이를 바탕으로 본 연구에서는 빗물이용시설의 용수 이용률을 최대도 고려하기 위해서 강우사상 사이에 3일 이상

Table 2. Parameter ranges used in the Haeundae case study

Parameter	Value
Rooftop catchment area	1 - 180 m <sup>2</sup>
Storage volume	1 - 60 m <sup>3</sup>
First flush	0.4 mm after 3 dry days
Multifamily building toilet flushing demand, high flow fixtures	1.7 m <sup>3</sup> /day - annually
Multifamily building toilet flushing demand, low flow fixtures	0.5 m <sup>3</sup> /day - annually
Backyard irrigation water demand	0.4 m <sup>3</sup> /day - May 1 through October 31
Air conditioning water demand	15 l/day - May 1 through October 31



무 강우일을 가진 강우사상의 강우량 중 초기의 0.5 mm 가 초기슬림량으로 발생된다고 가정하였다.

3.2.3. 빗물 수요량 특성

저장탱크에 집수된 용수는 화장실용수, 관개용수, 에어컨 냉각용수, 청소용수, 소방용수 등과 같이 다양하게 사용된다. 본 연구에서의 수요특성은 화장실용수, 관개용수, 에어컨 냉각용수로 구분하였다. 수요특성에 대한 수요량은 뉴욕시 PLUTOTM 자료를 기준으로 작성되었다.

첫 번째로 화장실 용수에 대해 수요량은 다음과 같이 결정하였다. 4가구(15명)가 거주하고, 화장실 사용횟수가 매일 일인당 6번인 주거건물을 가정하였을 때 화장실이 고유량 시설이면 약 1700 L/day, 저유량 시설이면, 약 500 L/day 로 산정된다. 현재 뉴욕시는 일반적으로 저유량 시설을 사용하고 있으므로 이를 기준으로 500, 650, 800, 950 L/day 로 네 가지 경우를 각각 적용하였다.

두 번째로 관개용수의 수요량을 평가하기 위해서 PLUTOTM 자료에 따라 평균적으로 미개발지역의 50%가 잔디나 정원으로 이용된다고 가정하였다. 이때 뉴욕시의 경우 70 m<sup>2</sup> 가 잔디나 정원으로 활용되고 있는 지역으로 확인되었다. 또한 이러한 지역은 성수기(5/1~10/31)에만 빗물이용시설이 사용되며 이 기간에 매주 4 cm의 관개용수 수요량이 발생하게 된다. 이러한 조건에 따라 70 m<sup>2</sup>의 면적에 대해 하루기준으로 단위환산하게 되면 0.4 m<sup>3</sup>/day 이 된다. 따라서 본 연구에서는 뉴욕시의 연구결과를 참조하여 관개용수

수요량에 대해 동일한 값을 적용하였다.

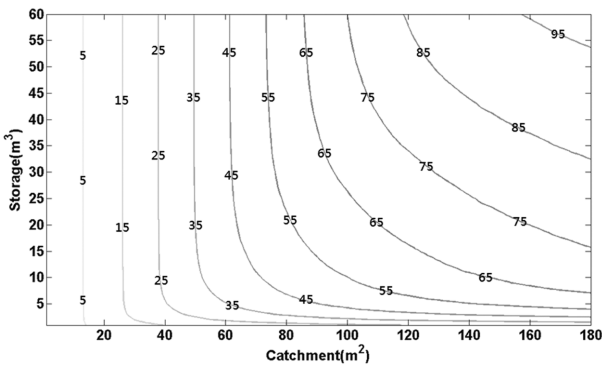
세 번째로 에어컨냉각용수의 수요량은 뉴욕시 지역정보 웹사이트에 있는 New York CEQR(City Environmental Quality Review) 기술 편람에 따라 15 L/day 로 설정하였다. 또한 에어컨 냉각용수는 에어컨 사용이 집중되는 성수기에만 수요가 발생한다고 가정하였다.

3.3. 신뢰도 평가

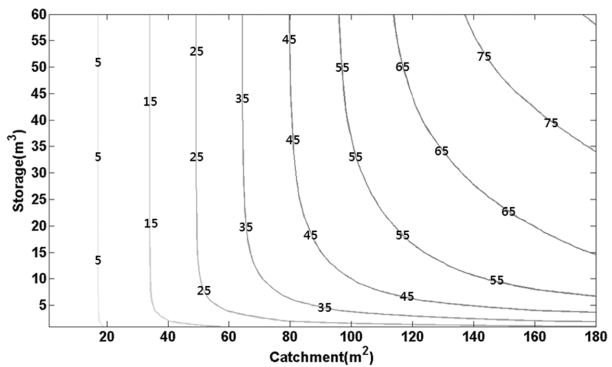
부산광역시 신시가지에 위치한 건물들을 대상으로 화장실용수, 관개용수, 에어컨 냉각용수 공급을 위해 설치된 빗물이용시설의 신뢰도를 곡선을 산정하였으며 이를 Fig. 21 ~ 23에 제시하였다. 이때 본 연구에 적용된 빗물이용시설은 초기슬림특성을 고려하였기 때문에 초기슬림특성이 고려되지 않은 시설의 신뢰도보다 다소 낮게 산정되었다. 이러한 결과들을 참고하여 새로운 빗물이용시설의 규모를 산정하거나 기존의 빗물이용시설의 신뢰도를 예측하는데 유용하게 사용될 수 있다.

3.3.1. 화장실 용수에 대한 신뢰도

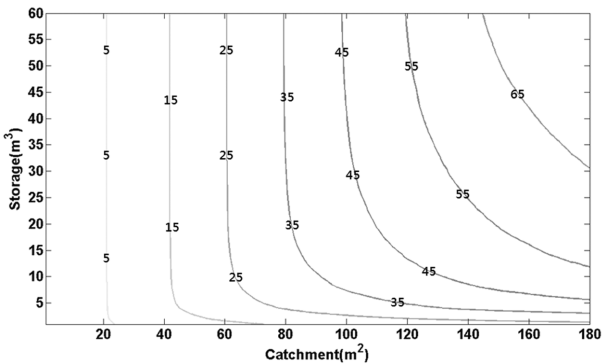
Fig. 21은 화장실 용수의 수요량이 500, 650, 800, 950 L/day 일 경우에 빗물이용시설의 신뢰도 곡선을 보여준다. 일반적으로 배수면적이 증가함에 따라 신뢰도가 높게 나타난다. 배수면적이 일정할 경우 저장탱크용적이 증가할 때 신뢰도 또한 높게 나타난다. 하지만 저장탱크용적이 크다고 해서 신뢰도가 계속 증가하지는 않는다. 그리고 화장실 용



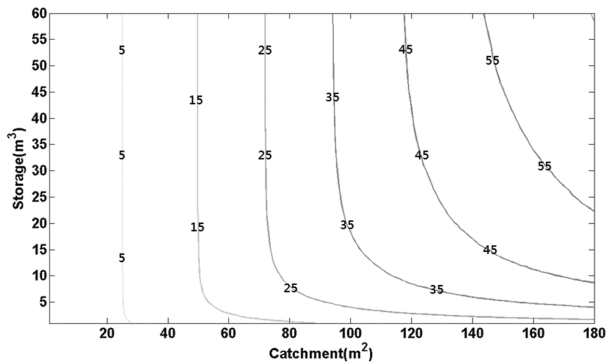
(a) Demand = 500 liters/day



(b) Demand = 650 liters/day



(c) Demand = 800 liters/day



(d) Demand = 950 liters/day

Fig. 21. Toilet flushing reliability contour.

수의 수요량이 증가함에 따라 신뢰도가 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 해운대 신시가지에 일반적인 지붕면적의 크기는 51-75  $m^2$ 인 것을 고려하여 지붕면적이 75  $m^2$ , 저장탱크용적이 10  $m^3$  3.3.2일 경우 수요량에 따른 신뢰도는 24~46%로 산정되었다. 또한 수요량이 500 L/day, 저장탱크용적이 10  $m^3$ 일 때 배수면적에 따라 최소 1~70%로 산정되었다.

3.3.2. 관개용수에 대한 신뢰도

Fig. 22는 관개용수로 사용될 경우 빗물이용시설의 신뢰도 곡선을 보여준다. 저장탱크용적과 배수면적의 모든 범위에서 31~99%이상의 신뢰도이며, 연구지역에 일반적인 지붕면적에 적용되었을 경우 저장탱크용적 범위에 따라 51~99%의 신뢰도를 보여준다. 그리고 30  $m^2$  이하인 배수면적을 가지는 경우 저장탱크용적이 증가하여도 신뢰도는 크게 증가하지 않으며 70  $m^2$  이상인 배수면적에 경우에는 저장탱크용적이 증가함에 따라 신뢰도 또한 민감하게 반응하여 증가한다.

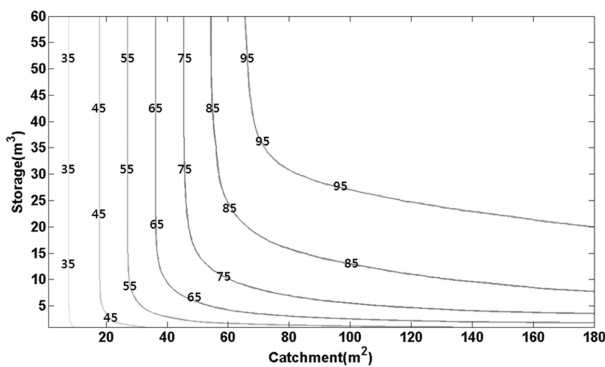


Fig. 22. Irrigation reliability contour.

3.3.3. 에어컨 냉각용수에 대한 신뢰도

Fig. 23은 에어컨냉각용수로 사용될 경우 빗물이용시설의 신뢰도 곡선으로 저장탱크용적과 10  $m^2$ 이하인 배수면적에 대해 81%이상의 신뢰도를 보여준다. 에어컨냉각용수의 수요량은 15 L/day로 매우 적은 양이 사용되므로 신뢰도 또한 매우 높게 나타난다. 본 연구 결과에 따르면 작은 지붕면적을 이용하여 80%이상의 신뢰도를 확보할 수 있음을 보여준다.

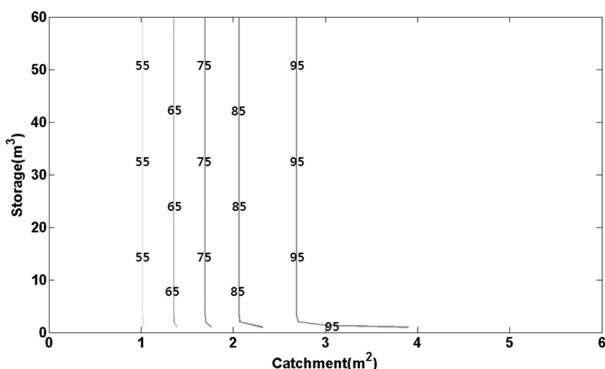


Fig. 23. Air conditioning reliability contour.

3.3.4. 최대용적으로 채워지는 시간

Fig. 24는 배수면적이 주어졌을 때 저장탱크용적을 가득 채우는데 걸리는 개월 수를 그래프로 산정하였다. 예상처럼 배수면적이 클수록 그리고 저장탱크 용적이 작을수록 소요되는 시간은 줄어들었다. 반대로 배수면적이 작고 저장탱크 용적이 클 경우에 소요되는 시간이 많게는 몇 년이 걸릴 수도 있다. 이는 빗물이용시설을 설계하기 이전에 이러한 평가가 먼저 선행되어야 할 필요성을 제시하고 있다.

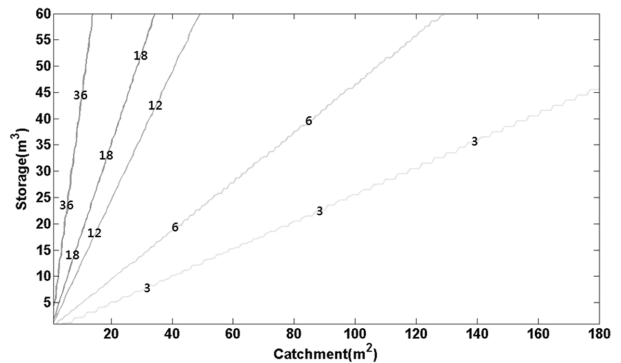


Fig. 24. Time required to fill the storage volume from precipitation (months).

3.4. 고찰

3.4.1. 신뢰도 산정에 대한 계절성 영향

Fig. 21~23에 제시된 신뢰도로는 연 기준으로 평가되었다. 이러한 신뢰도로는 계절 변동성을 적절하게 고려할 수 없기 때문에 신뢰도의 월변동성 평가를 추가적으로 실시하였다. 먼저 빗물이용시설이 지붕배수면적 100  $m^2$ , 저장탱크용량 10  $m^3$ , 수요량 500 L/day인 특정 값을 가지도록 설계하였다. 또한 초기스플림특성을 고려하였으며 연중 항상 작동 되도록 하였다. 이러한 설계조건에서 SARET의 강우 발생기를 사용하여 30년 합성 일 강우자료를 300개 발생시켰다. 이 자료를 통해 월별신뢰도를 산정하면 Fig. 25와 같이 분석된다. 월별 신뢰도의 평균은 12월에 15%로 가장 낮게, 7월에 95%로 가장 높게 산정되었다. 그리고 신뢰도의 IQR

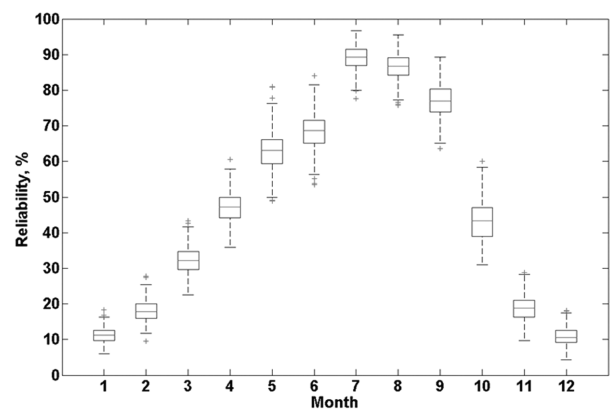


Fig. 25. Monthly variability in RWH system reliability considering a 100  $m^2$  catchment, 10  $m^3$  storage tank, 500 l/day demand.

(Interquartile range)은 일반적으로 여름과 가을에는 높게 그리고 봄과 겨울에는 낮게 산정되었다. 이처럼 신뢰도가 부산지점의 강우패턴과 유사한 경향을 나타내는 것을 볼 때 계절성 영향을 받는 것을 알 수 있다.

### 3.4.2. 강우유출수 및 수돗물 사용량 저감 영향

SARET를 이용하여 특정지역에 대한 강우유출수 및 수돗물 사용량 저감 영향을 알아보기 위해서 빗물이용시설을 가진 연구지역을 다음과 같이 설정하였다. 연구지역의 면적은 2 ha이며, 지붕면적이 60, 100, 170 m<sup>2</sup>인 배수구역에 5, 10, 20 m<sup>3</sup> 저장탱크가 20개씩 분산 설치되었다. 저장탱크용량은 용량이 커질수록 비용이 증가하기 때문에 비용측면에서 가장 효과적인 크기로 선정되었다. 수요특성은 화장실용수로 500 L/day로 정하였으며, 이를 시간단위로 환산하면 약 21 L/hr이다. 그리고 초기슬림은 고려되지 않았으며, 강우자료는 2003년 부산지점의 시간 관측 강우자료를 사용하여 시간에 따른 저감 영향을 평가하였다.

위의 조건에 따라 빗물이용시설 설치 유/무에 따른 강우유출량 및 수돗물 사용량이 시간별로 산정되었다(Fig. 26). 연구지역에 빗물이용시설이 설치되었을 경우에 설치되지 않았을 때보다 강우유출량이 19%, 수돗물 사용량이 53%로 각각 감소되는 것을 확인하였다. 이는 독일의 경우 용수사용량 감소량이 30~60%이며, 호주의 경우 60%로 본 연구와 비슷한 결과를 보여주고 있다(Coombes et al., 1999; Hermann and Schmida, 1990). Coombes 등(1999)는 빗물이용시설을 이용하여 지붕에서 발생한 강우유출수를 대부분 처리가능하다는 주장에 일치하는 본 연구의 결과를 통해 빗물이용시설을 이용하여 도시용수를 추가적으로 확보할 수 있으며, 동시에 강우유출수를 저감할 수 있음을 보여준다.

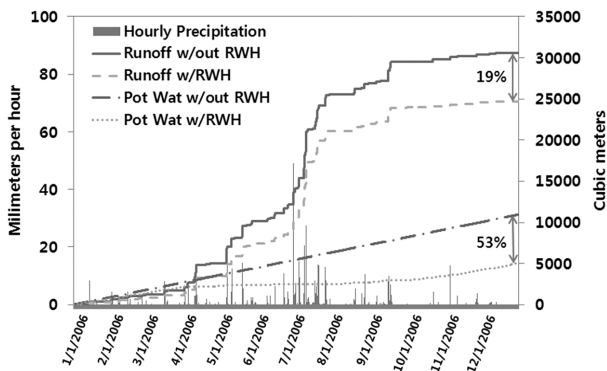


Fig. 26. Annual reduction in runoff and potable water demand when rooftop rainwater is used to flush low flow toilets in a imaginary study area.

## 4. 결론

본 연구에서는 부산광역시 해운대 신시가지를 대상으로 빗물이용시설 신뢰도 모형을 평가하고자 하였다. 이 모형은 비모수적 강우발생기 알고리즘으로 구성되어있으며, 관측 강우자료를 이용하여 통계적인인 방법으로 실행되므로 다

른 빗물이용시설과 비교하였을 경우 간편하게 사용될 수 있다. 또한 이 모형은 부산지역의 강우특성을 적절하게 모의하였으며, 추후 보다 높은 차원의 마코프 연쇄 모형을 이용하거나 또는 강우량의 자기상관특성을 고려한 모형의 확장에 용이한 구조를 가지고 있다.

해운대 신시가지에 위치한 건물의 지붕배수면적에 빗물이용시설을 설계하였을 경우 적절한 비율로 수요량이 충족될 수 있었다. 대상지역에서 저유량 화장실용수를 사용될 경우 신뢰도가 45%이며, 관개용수 및 에어컨냉각용수로 사용될 경우 신뢰도가 80% 이상으로 평가되었다. 그리고 대상지역의 모든 건물에 적절한 규모로 빗물이용시설이 설치가 된다고 하였을 때 연간 수돗물 사용량을 약 53%, 하수관거로 배출되는 강우유출량을 약 19% 저감할 수 있었다. 강우유출수가 적게 배출된다면 하수도 시설의 범람과 역류가 줄어들 것이며, 또한 비점오염물질을 일부 차단하여 공공수역의 수질개선 효과도 발생할 것이다. 그리고 도시 및 인구성장에 따라 도시용수의 확보가 점점 어려워지는 현실을 고려하였을 때 빗물이용시설로 도시용수 확보를 확보한다면 수자원을 보다 효율적으로 관리할 수 있을 것이다. 하지만 국내의 경우 빗물이용시설에 대한 표준지침이 없기 때문에 모델에 입력되는 매개변수를 입력 해외 문헌에 의존해야 하는 한계가 존재한다. 따라서 국내 실정에 필요한 자료구축(예를 들면, 해당지역 지붕면적, 빗물 수요량, 초기슬림 등)이 적절하게 수행되어야 하며, 이에 따른 추가적인 연구가 필요할 것이다. 또한 빗물이용시설이 적절하게 적용되려면 제도적으로 충분한 검토가 이루어져야 하며 빗물이용시설을 통한 장점들이 달성되기 위해서는 충분한 시간이 필요할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2009-0065511).

## 참고문헌

- 강원구, 정은성, 이길성, 오진호(2010). 확률분포를 이용한 지속가능한 빗물이용시설의 저류용량 산정. *수질보전 한국물환경학회지*, 26(5), pp. 740-746.
- 과학기술부(2004). *21세기 프론티어연구개발사업-수자원의 지속적 확보기술개발사업-우수 저류 및 활용기술 개발 연구보고서*.
- 농림부(2003). *농어촌지역 우수의 생활용수 이용시스템 개발 연구보고서*.
- 대한상하수도학회(2003). *빗물이용시설 보급 확대를 위한 정책방안 연구*. 연구보고서.
- 서울시정개발연구원(2003). *빗물이용을 통한 도시 침수저감 및 수돗물 절약방안*. 연구보고서. 시정연 2003-R-13.
- 유철상, 김경준, 윤주환(2008). 빗물이용의 수문학적 평가: 1. 수문해석. *수질보전 한국물환경학회지*, 24(2), pp. 221-229.
- Apipattanavis, S., Podesta, G., Rajagopalan, B., and Katz, R. W. (2007). A semiparametric multivariate and multisite weather

- generator. *Water Resources Research*, **43**, W11401. doi: 10.1029/2006WR005714.
- Basinger, M., Montalto, F., and Lall, U. (2010). A rainwater harvesting system reliability model based on nonparametric stochastic rainfall generator. *Journal of Hydrology*, **392**, pp. 105-118, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.07.039.
- Coombes, P. J., Argue, J. R., and Kuczera, G. (1999). Figtree Place: a case study in water sensitive urban development (WSUD). *Urban Water*, **1**, pp. 335-343.
- Cowden, J. R., Watkins, D. W., and Mihelcic, J. R. (2008). Stochastic rainfall modeling in West Africa: parsimonious approaches for domestic rainwater harvesting assessment. *Journal of Hydrology*, **361**, pp. 64-77.
- Daigger (2009). Evolving urban water and residuals management paradigms: water reclamation and reuse, decentralization, and resource recovery. *Water Environment Research*, pp. 809-822.
- Fox, P., Rockstrom, J., and Barron, J. (2005). Risk analysis and economic viability of water harvesting for supplemental irrigation in semi-arid Burkina Faso and Kenya. *Agricultural Systems*, **83**, pp. 231-250.
- Ghisi, E. (2006). Potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil. *Building and Environment*, **41**, pp. 1544-1550.
- Gould, J. and Nissen-Petersen, E. (1999). *Rainwater Catchment Systems for Domestic Supply : Design, Construction and Implementation*. Intermediate Technology Publications: London.
- Guo, Y. and Baetz, B. W. (2007). Sizing of rainwater storage units for green building applications. *Journal of Hydrologic Engineering*, pp. 197-205.
- Herrmann, T. and Schmida, U. (1999). Rainwater utilization in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects. *Urban Water*, **1**, pp. 307-316.
- Lall, U., Rajagopalan, B., and Tarboton, D. G. (1996). A non parametric wet/dry spell model for resampling daily precipitation. *Water Resources Research*, **32**(9), pp. 2803-2823.
- Lall, U. and Sharma, A. (1996). A nearest neighbor bootstrap for resampling hydrologic time series. *Water Resources Research*, **32**(3), pp. 679-693.
- Lee, K. W., Lee, C. H., Yang, M. S., and Yu, C. C. (2000). Probabilistic Design of Storage Capacity for Rainwater Cistern Systems. *Journal of Agricultural Engineering Systems*, **77**(3), pp. 343-348.
- Martinson, D. B. and Thomas, T. (2005). *Quantifying First Flush Phenomenon: Effects of First-flush on Water Yield and Quality*. Proceedings of the 12th International Conference on Rain Water Catchment. New Delhi, India.
- Rajagopalan, B., Lall, U., and Tarboton, D. G. (1997). Evaluation of kernel density estimation methods for daily precipitation resampling. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, **11**(6), pp. 523-547.
- Sharma, A. and Lall, U. (1999). A nonparametric approach for daily rainfall simulation. *Mathematics and Computers in Simulation*, **48**, pp. 361-371.
- 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*, **53**, pp. 393-399.
- Texas Water Development Board (2005). *The Texas Manual on Rainwater Harvesting*. Accessed online at [Http://www.twdb.state.tx.us/publications/reports/RainwaterHarvesting\\_Manual\\_3rdedition.pdf](http://www.twdb.state.tx.us/publications/reports/RainwaterHarvesting_Manual_3rdedition.pdf)
- Zhang, D., Gersberg, R. M., Wilhelm, C., and Voigt, M. (2009). Decentralized water management: rainwater harvesting and greywater reuse in an urban area of Beijing, China. *Urban Water Journal*, **6**(5), pp. 375-385.