빗물이용시설 신뢰도 평가모형의 국내 적용을 위한 매개변수 산정: 부산광역시에의 적용

Parameter Estimation Methods of Rainwater Harvesting System Reliability Model for Improving the Applicability to Korea: Application to Busan, Korea

김문성* · 강두기** · 박무종*** · 김상단****

Keem, Munsung*, Kang, Dookee**, Park, Moojong***, Kim, Sangdan****

Abstract

Rainwater harvesting(RWH) system reliability model provides useful information on the RWH design since the model can generate the quantitative result, the reliability, of whether RWH system meets water utility amount of a certain region. The reliability is influenced by rainfall, water demand, and residence characteristics of the region, which can be considered as the model parameters. However, in Korea, appropriate data for estimating the parameters have not been established, so it is difficult to apply the reliability model to Korea. Therefore, in this paper, we propose the methodology to estimate the model parameters based on available data in Korea and try to improve the applicability of the model to Korea by applying the methodology to Busan, Korea. Especially, in order to consider the seasonal variability of the reliability, we generate water demand on a monthly basis that is one of the most important parameters. As a result, we observed that parameter estimations using the methodology proposed in this paper can represent the seasonal characteristics of rainfall and water demand more efficiently, and these results can help improve the model accuracy.

Key words : Rainwater Harvesting system, Reliability, Water demand

요 지

빗물이용시설 신뢰도 평가모형은 빗물이용시설이 해당 지역의 물수요량을 충족시킬 수 있는가에 대한 정량적인 결과를 산출하여 빗물 이용시설의 설계에 유용한 정보를 제공한다. 이러한 신뢰도는 대상지역 고유의 강우특성, 물수요특성, 주거 특성에 영향을 받기 때문에 이 특성들은 매개변수로써 모형 내에 고려된다. 하지만 국내의 경우 이들 매개변수를 산정할 수 있는 자료가 미비하여 신뢰도 평가모형의 적용에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 이용가능한 자료를 바탕으로 빗물이용시설 신뢰도 평가모형의 매개변수를 산정할 수 있는 방법론을 제시하고 부산광역시에 적용함으로써 신뢰도 평가모형의 국내 적용성을 높이고자 하였으며, 특히 신뢰도 평가에 있어서 강우량과 함께 가장 중요한 매개변수인 물수요량을 월별로 산정함으로써 신뢰도의 계절적 변동성을 고려하고자 하였다. 분석한 결과 본 연구의 매개변수 산정방법을 통해 빗물이용시설의 연평균 신뢰도와 신뢰도의 계절적 변동성을 보다 정확하게 모의할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 빗물이용시설, 신뢰도, 물 수요량

1. 서 론

우리나라는 1960년대 이후 급속한 산업화와 도시화가 이루

어졌으며, Ministry of Environment, Korea(2006)는 전체인구 대비 도시화율이 1998년 86%에서 2020년 92%로 증가하고 이 증가 추세는 향후 더욱 가속화 될 것으로 전망하고 있다.

*정회원. (주)웹스 대리(E-mail: ms_keem@nwater.co.kr)
Member. Assistant manager, Watershed Management Department, WEMS

**정회원. (주)웹스 대표이사 Member, CEO, WEMS

***정회원. 한서대학교 토목공학과 교수 Member. Professor, Department of Civil Engineering, Hanseo University
****교신저자. 정회원. 부경대학교 환경공학과 부교수(Tel: +82-51-629-6529, Fax: +82-51-629-6523, E-mail: skim@pknu.ac.kr)
Corresponding Author. Member. Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

세계적으로도 도시화는 급속히 진행 중이며, 2030년에는 총 인구의 80%가 도시에 거주하며 거대도시 또한 더욱 많이 형성될 것으로 예측되고 있다. 수문학적 측면에서 도시의 발달이란 전, 답, 임야 등의 강수가 침투할 수 있는 투수지역들이 건물이나 포장도로 등으로 피복되어 더 이상 강수가 땅으로 침투할 수 없는 불투수 지역으로 변화하는 것으로 볼 수 있으며, 이는 홍수의 증가와 지하수위의 감소, 하천유량의 감소, 생태계 파괴 등을 야기시키며 기존의 유역 자체가 보유하고 있던 물순환 패턴을 왜곡시키게 된다(Ahn *et al.*, 2011).

물순환 패턴의 왜곡은 수자원을 안정적으로 확보하고 관리하는 데에 부정적인 영향을 미치게 되며, 특히 최근 기후변화로 인하여 집중호우, 폭설, 태풍, 가뭄과 같은 극한 수문 사상의 발생 빈도가 증가함에 따라(Keem *et al.*, 2009) 수자원의 안정적 확보에 대한 어려움은 더욱 가중되고 있는 실정이다. 2009년에 태백시에서 먹는 물이 부족한 사태가 발생한 것은 이러한 문제점의 단적인 예라 볼 수 있다.

도시화로 인한 물순환 왜곡의 문제점을 극복하고 지속적으로 수자원을 관리하기 위하여 현재 미국, 유럽, 캐나다, 호주 등에서는 LID(Low Impact Development) 개념의 도시 물 순환 관리 패러다임을 도입하여 연구개발을 진행하고 있으며, 우리나라에서도 여기에 발맞추어 환경부를 비롯하여 국토해양부, 소방방재청 등에서 LID 개념을 도입하여 도시 물 순환 관리 및 비점오염원 관리, 빗물 관리 등에 적용하고 있다.

상기 LID 적용 기술 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. 때문에 수자원 확보와 관리를 위한 방안으로써 빗물이용시설을 이용한다면 지속적이고 효율적으로 도시 수자원을 관리할 수 있을 것이란 평가를 받고 있다(Choi *et al.*, 2011). 특히 지붕과 옥상면의 유출수를 집수하여 이용하는 지붕빗물 이용시설의 경우 별다른 처리 없이도 양호한 수질의 빗물을 얻을 수 있으며, 때문에 다른 집수면을 이용한 빗물이용시설에 비하여 더욱 다양한 용도로 활용될 수 있다. 빗물이용시설의 장점을 인식한 우리나라 정부에서는 자연재해대책법, 도시 및 주거환경정비법, 물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률 등과 같은 여러 법률들에서 빗물이용시설에 관련된 조항을 규정하고 있으며 지방자치단체에서도 관련 조례 등을 통해 빗물이용시설의 설치를 장려하고 있다(Song *et al.*, 2012).

현재, 빗물이용의 시설과 기술적인 측면에 있어 선진적인 해외 국가들은 예측되는 세계적인 물 부족 문제라는 보편적인 위기에 사전에 대처하면서 각각 자국의 기후와 환경 등 특수한 상황에 적합한 다양한 빗물이용 기술과 시설을 개발해 시행하고 있다. 빗물이용사례는 전 세계적으로 다양하게 보고되고 있으며(Cowden *et al.*, 2008), 아프리카와 아시아, 남미에서

는 20세기 후반에 인구 및 도시 성장에 따라 필요한 물을 충당하기 위하여 빗물이 이용되기도 하였다(Lee *et al.*, 2000). 특히, 궁극적으로 수자원 확보 및 관리라는 목적으로 최근 다양한 모형들을 이용하여 빗물이용시설을 평가하고 있으며, 지역 및 기후특성에 따라 빗물이용시설의 용도와 용량, 설치 효율 등의 평가와 함께 빗물이용시설의 최적 설계 용량 결정 기법이나 설계 기준방안에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Basinger *et al.*, 2010; Cowden *et al.*, 2008; Ghisi, 2006; Guo and Baetz, 2007; Hermann and Schmida, 1999; Su *et al.*, 2009).

국내에서도 ‘빗물이용시설 보급 확대를 위한 정책방안 연구’(Han, 2003)에서 빗물이용과 관련한 다양한 추가 연구의 필요성을 제시한 것을 필두로 서울시정개발연구원, 농림부, 과학기술부와 같은 연구기관에서 다양한 연구를 진행해 왔다(Choi *et al.*, 2011). 또한 학계 내에서도 빗물이용시설과 관련하여 초기 우수의 수질 특성 분석, 물순환 회복에의 기여도 평가, 경제성 평가, 홍수량 저감 평가 등에 대한 연구가 진행되고 있다(Kang *et al.*, 2010; Mun and Han 2009; Yoo *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2002; Han and Kim 2004; Han *et al.*, 2005). 하지만 국내의 빗물이용에 관련된 연구의 경우 자신의 전문 분야의 이론과 시각에 기초한 접근인 경우가 대부분이어서 빗물이용에 관한 종합적이고 체계적인 연구가 미흡한 실정이다. 특히 빗물이용시설의 활용도를 증가시키고 제한된 재원 내에서 효과적으로 빗물이용시설을 설치할 수 있는 최적 용량 결정 방법이나 설계 기준 방안에 대한 연구가 미비하여 그 필요성이 지적되고 있다(Choi *et al.*, 2011).

이러한 필요성에 따라 Choi *et al.*(2011)은 특정 지역의 강우특성, 물이용 특성, 주거 특성 등을 고려한 빗물이용시설의 신뢰도 평가, 즉 특정 지역의 빗물이용시설이 해당 지역의 물 수요량을 충족시킬 수 있는가에 대한 여부를 정량적으로 분석할 수 있는 신뢰도 평가모형인 Storage and Reliability Estimation Tool(SARET)을 소개하고(Basinger *et al.*, 2010) 부산광역시시에 적용한 바 있다. 하지만, 이 연구의 경우 신뢰도 평가모형의 매개변수인 저장탱크용적, 빗물 수요량, 초기 쓸림 등을 해외 문헌에 의존하여 산정함으로써 국내의 실정을 충분히 반영하지 못한 한계점을 지니고 있다.

따라서 본 논문에서는 상기 소개된 신뢰도 평가모형의 매개변수를 현재 국내에서 획득 가능한 자료를 토대로 산정할 수 있는 방법을 제시하여 국내 적용성을 향상시킴과 동시에 빗물이용시설의 설치 목적을 고려하여 최적의 효율을 얻을 수 있는 시범구역 선정기준을 제시함으로써 빗물이용시설 설치 시 우선순위를 선정할 수 있는 기초적인 방법론을 제시하여 실무적인 적용성 또한 높이고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구에는 Choi *et al.*(2011)에 의해 소개된 바 있는 비모

Fig. 1. Schematic Diagram of the SARET(Choi *et al.*, 2011).

수적 추계학적 일 강우 발생기 기반의 빗물이용시설 신뢰도 평가모형인 Storage and Reliability Estimation Tool(SARET) 모형을 이용하여 대상 지역의 신뢰도를 평가하며, 크게 비모수적 강우발생모델과 신뢰도 평가모델로 구성된다. 본 모형의 기본구조를 Fig. 1에 나타내었으며, 보다 자세한 사항은 Choi *et al.*(2011)을 참조할 수 있다.

2.1 비모수적 강우발생모델

본 모형에서 사용하는 강우발생모델은 통계적 강우발생기법 중 비모수적 방법을 이용한 것으로서, 강우량의 확률분포형에 대한 선제적인 가정이 필요하지 않아 다양한 지역에 손쉽게 이용될 수 있다.

본 강우발생모델은 오늘의 강우발생유무는 어제의 강우발생유무에만 의존하는 시간적 상관특성을 가정하여 2변수 1차 마코프 연쇄모형을 통해 일 관측 강우자료로부터 강우발생확률을 산정하고 bootstrap 법을 통해 강우량을 산정하게 된다.

강우발생모델의 관측 강우 자료에 대한 재현성을 분석하기 위하여 기상청 부산지점의 1982년부터 2011년까지의 30년 관측 강우자료를 이용하여 강우모델에 적용하였으며, 그 결과 모의된 강우자료가 관측 강우자료의 월강우량 평균 및 표준편차, 월 무강우 일수의 평균 및 표준편차, 연평균 강우량과 유사한 경향을 나타내어 관측 강우자료의 통계적 특성을 우수하게 재현하는 것으로 나타났다. Fig. 2에 이러한 결과 중 일부를 나타내었으며 여기에서 “observed”는 관측 월평균 강우량, “simulated”는 강우발생모델을 통해 모의된 300년간의 강우시계열의 월평균 강우량을 의미한다.

다만, 본 강우모델의 강우량 모의 방법의 구조적인 특성 때문에 극한 강우사상 모의에는 다소 한계점이 존재하지만, 빗물이용시설은 주로 일반적인 강우량이 발생할 때를 대상으로 설계되기 때문에 신뢰도 평가에 미치는 영향은 비교적 작을 것으로 판단된다(Choi *et al.*, 2011). 결론적으로 본 강우모델을 이용한 모의 강우자료는 관측자료의 양적 측면 뿐만 아니라 강우변동성 및 계절성을 잘 재현하는 것으로 나타났다.

2.2 신뢰도 평가모델

신뢰도 평가모델은 강우발생모델에서 모의된 강우자료와

(a) Monthly average rainfall

(b) Monthly average no rain days

Fig. 2. Simulation Results of Non-parametric Stochastic Daily Rainfall Generator.

함께 지붕면적, 저장탱크용량, 초기 쓸림특성 및 초기 쓸림량, 물 수요특성에 따른 수요량을 고려하여 물수지법을 토대로 신뢰도를 산정하게 된다. 지붕빗물이용시설에서의 신뢰도란 지붕면적을 통해 집수된 빗물을 저장탱크에 저장하여 이용할 때 전체 기간 중에서 물수요량을 충족시킬 수 있는 날의 수를 의미한다. 즉, 신뢰도가 0.8 이라는 것은 전체 기간을 100일로 하였을 때 한 가정에서 지붕빗물이용시설을 통해 평균적으로 80일간의 물 수요량을 충족시킬 수 있다라는 의미를 가진다. 본 모델은 분석 목적에 따라 연평균 물수요량 뿐만 아니라 월 및 일별 물수요량의 변동성을 고려할 수 있도록 구성되어 있으며, 연속적(예로써, 화장실용수) 혹은 간헐적(예로써, 관개용수)으로 요구되는 물수요량을 입력 매개변수의 구조를 변경함으로써 손쉽게 고려할 수 있는 장점이 있다.

빗물이용시설의 저장탱크에 저장되는 물의 양은 일단위로 아래의 물수지식으로부터 산정된다.

$$\begin{aligned}
 S_i &= 0 & \text{if } S^* < 0 \\
 &= S^* & \text{if } 0 \leq S^* \leq S_{\max} \\
 &= S_{\max} & \text{if } S^* \geq S_{\max} \\
 S^* &= S_{i-1} + (A \times \text{Max}[0, P_i - FF]) - D_i
 \end{aligned} \tag{1}$$

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

있는 물의 양 $[L^3]$, A 는 배수면적 $[L^2]$, P 는 “ t ”날의 강우량 $[L]$, FF 는 초기 쓸림량 $[L]$, D 는 “ t ”날의 빗물 수요량 $[L^3/T]$, S_{max} 는 저장탱크용량 $[L^3]$ 이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시범구역 선정

시범구역을 선정하기 위해서 지붕빗물이용시설의 사용목적 을 고려하는 것은 필수적이라 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 부산광역시 내 용수 공급이 부족하거나 상수도 정비가 불완전한 지역(목적 : 갈수지역 용수 공급)과 도시 내 지붕빗 물이용시설의 설치가 용이한 주택건물이 밀집된 지역(목적 : 강우유출수 저감 및 재사용)에 초점을 맞춰 조사를 실시하여 시범구역을 선정하고자 하였으며, 이러한 방법은 제한된 재원을 이용하여 빗물이용시설 설치를 위한 우선순위를 결정할 경우 기본적인 평가 방법으로도 활용 가능할 것으로 생각된다.

시범구역을 선정하기 위하여 먼저 부산광역시에서 용수공 급이 부족한 지역을 조사해 보았다. 그 결과 현재 부산광역시 는 지속적인 상수도 보급으로 인하여 99.9%의 상수보급률을 보이고 있으며, 미급수지역의 경우 상수도 보급은 완료된 상 태이나 경제적 이유로 인하여 마을상수도, 소규모급수시설, 지하수 등을 이용하는 것으로 나타났다. 특히 가뭄 시에도 충 분히 상수도를 공급할 수 있는 것으로 조사되었으며 상수도 미보급지역이라 할지라도 부산광역시에서는 시설분담금제도를 통해 저렴한 가격으로 지역, 거리 등에 상관없이 상수도 시설을 설치할 수 있어 상수도대신 빗물을 주 상수원으로 사 용할 가능성은 낮다고 판단된다.

이러한 부산광역시의 지역적 특성을 고려하였을 때, 지붕빗 물이용시설은 기존 상수도에 대한 보조적 수단으로 사용하는 것이 가장 합리적인 것으로 판단되며, 따라서 갈수지역에의 용수공급 측면보다는 수자원의 효율적 사용 측면에 초점을 맞추어 시범구역을 선정하는 것이 보다 적절할 것으로 생각 된다. 따라서 본 연구에서는 시범구역 선정 기준을 ① 주택 밀집 지역, ② 지형 특성, ③ 경제적 능력으로 설정하고 부산 광역시를 행정구역 분류기준 중에서 “동”을 기준으로 기초 통계 자료 수집 및 분석, 지형분석을 통해 이 기준들에 적합 한 시범구역을 선정하고자 하였다.

상기 시범구역 선정 기준 중에서 주택 밀집 지역을 선정한 것은 빗물이용시설 설치의 현실성을 반영한 것이다. 주택과 비교하였을 때 아파트는 다수의 세대가 거주하고 있으며, 모 든 세대의 물수요량을 충족시키기 위해서는 대규모 용량의 탱크가 필요하다. 하지만 이미 건설된 아파트에 대규모 용량 의 탱크를 설치하기 위해서는 그에 상응하는 공간과 비용이 필요함에 현실성이 떨어질 것이다. 따라서 보다 현실적인 연 구 결과, 즉 실제 빗물이용시설의 설치 가능성을 고려하기 위

Fig. 3. Satellite Photograph of Gamcheon 2-dong, Busan.

해서는 빗물이용시설의 설치가 용이한 단독주택이 밀집되어 있는 지역을 시범구역으로 선정하는 것이 타당할 것으로 판 단된다. 지형 특성의 경우 빗물이용시설의 설치 시 강우유출 수의 저감효과에 대한 기여도를 반영하기 위한 것이며, 경제 적 능력을 고려한 것은 입주민의 빗물이용시설 설치에 대한 동기 여부를 반영하기 위해서이다. 다시 말하면, 산지에 위치 하고 불투수율이 높은 지역에 빗물이용시설을 설치할 경우 강우유출수 저감효과를 극대화할 수 있을 것이며, 경제적 능 력이 평균적으로 낮은 지역이 경제적 능력이 높은 지역보다 빗물이용시설 설치에 따른 경제적 효과에 보다 많은 관심을 가질 가능성이 클 것이다.

이러한 기준을 적용하여 분석한 결과, 부산광역시는 지역 특성상 6·25 전쟁으로 인한 다수의 피난민들의 유입으로 인하여 무계획적으로 주거지가 형성된 지역이 존재하며, 이러한 지역의 경우 대체로 산지를 깎아 주택을 건설하였기 때문에 불투수율이 높은 급경사 지형의 형태를 보이는 것을 알 수 있었다. 또한 이 지역들은 일반적으로 접근성이 떨어져 지가가 낮고 노후화된 건물이 밀집되어 있으며 생활환경이 다소 열 악하다. 이러한 지역 중 대표적인 곳은 부산광역시 감천 2동 으로, 총 주택 호수에 대한 단독주택 호수의 비율이 80%로 아주 높으며, 또한 평균 연령이 44.2세로 부산광역시 평균인 39.7세에 비하여 4.5세 높고 비소득계층인 15세미만 및 65세 이상의 인구가 총인구의 29.40%로 부산광역시 사하구 내에 서 가장 높은 것으로 나타나 상대적으로 경제적 능력이 떨어 짐을 간접적으로 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 상기 시범구역 선정 기준에 부산광역시 사하구 감천 2동이 가장 적 합한 것으로 판단하여 신뢰도 평가의 시범구역으로 선정하였 다(Fig. 3).

3.2 신뢰도 평가모델 매개변수 선정

본 신뢰도 평가모형을 이용하기 위해서는 적용 지역의 고유 한 특성을 반영할 수 있는 적절한 매개변수 선정이 필수적 이다. 본 모형의 매개변수에는 지붕면적, 빗물이용시설 저장탱

Table 1. Summary of Parameter Estimation Methods

Parameter	Means of Estimation
Rooftop area	<ul style="list-style-type: none"> · Analysis of Digital Topographic Map · Frequency analysis on rooftop area data
Storage volume	<ul style="list-style-type: none"> · Product survey · Literature search · Analysis of monthly water demand
First flush	<ul style="list-style-type: none"> · Literature search
water demand	<ul style="list-style-type: none"> · Analysis on purposes of harvested rainwater use based on the water quality · Analysis on water demand in household

크 용량, 초기쓸림량, 수요특성에 따른 용도별 물 수요량이 있으며, 본 절에서는 시범구역인 부산광역시 사하구 감천 2동에 적용될 수 있는 매개변수의 산정방법에 대해 설명하고 그 결과를 나타내었다. 각 매개변수의 기본적인 산정방법은 Table 1과 같다.

3.2.1 지붕면적 산정

빗물이용에 대한 본격적인 연구가 진행되어온 역사가 짧은 우리나라의 경우 빗물이용탱크를 설치할 수 있는 지붕면적에 대한 자료가 사실상 전무한 실정이다. 본 연구에서는 이에 대한 대안으로 국토지리정보원에서 제공하는 1:1000 수치지형도를 이용하여 단독주택 레이어를 추출함으로써 빗물이용탱크를 설치할 수 있는 지붕면적 자료를 직접 구축하고자 하였다.

부산광역시 사하구 감천 2동 내 단독주택건물 지붕면적의 분포양상을 파악하기 위하여 빈도분석을 실시한 결과(Fig. 4) 1-175 m²가 조사된 전체 지붕면적의 약 99.4%를 차지하고 있으며, Basinger *et al.*(2010)과 Choi *et al.*(2011)의 지붕면적의 빈도분포와 비교해 보았을 때 다소 지붕면적이 작게 산정된 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 본 연구에서 산정한 지붕면적의 경우 지붕면적이 비교적 큰 연립주택이나 아파트를 제외하고 단독주택의 지붕면적만을 산정한 것에 기인한다고 볼 수 있을 것이다. 산정된 지붕면적 중 200 m²을 초과하는

Fig. 4. Building Footprint Histogram of Single Family Houses for Gamcheon 2-dong(m²).

경우는 0.53%에 불과하며, 따라서 본 연구에서는 빗물이용시설이 설치되는 지붕면적을 1-175 m² 범위로 설정하는 것이 적합하다고 판단하였다.

3.2.2 저장탱크 용량범위 산정

본 연구에서는 현재 시중에서 판매되고 있는 빗물이용시설 저장 탱크 용량을 조사·분석하여 현실적으로 설치 가능한 저장탱크의 용량을 산정하고자 하였다. 그 결과 업체별로 200 L ~100 t까지 다양한 용량의 탱크가 판매되고 있는 것으로 나타났다.

Texas water Development(2005)에 따르면 빗물이용시설에 실제로 사용되는 저장탱크의 용량은 2~56 m³이며, 이 범위를 초과하는 저장탱크는 지상에 설치되거나 지하에 매립되는 것으로 보고한 바 있다. 본 연구에서는 지붕에 설치되는 빗물이용시설을 고려하기 때문에 매개변수 산정 시 저장탱크의 용량을 56 m³이하로 하는 것이 적합할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 최대 저장탱크 용량을 결정하기 위하여 부산광역시 내 1가구 당 월 평균 물사용량을 조사하였으며, 조사 결과 2010년 기준으로 부산광역시의 1인당 일평균 가정용수 사용량이 157.8 L, 1가구의 평균 인구수는 4.64명(사하구 기준)으로 나타났다(Statistic Korea 2010; Busan Water Authority 2011). 따라서 1가구 당 월평균 22.3 m³의 가정용수를 사용하는 것을 알 수 있었으며, 상기 조사 결과를 바탕으로 1가구 당 월 평균 물사용량을 최대 저장탱크 용량으로 가정하여 저장탱크 용량 매개변수를 1~22 m³으로 설정하였다.

3.2.3 초기 쓸림량 산정

빗물의 경우 빗물 자체의 수질보다는 건기시 지붕에 쌓인 낙엽, 꽃가루, 나뭇가지, 동물의 배설물, 기타 대기 잔류물 등이 우기시 빗물에 포함됨으로써 수질오염을 발생시키게 된다. 빗물이용시설의 용수로 적합한 수질을 유지하기 위해서는 이러한 초기 쓰림량을 배제하는 것이 필요하다. 이러한 초기 쓰림은 무강우일이 3일 이상 지속될 경우 발생하게 된다고 보고되고 있다(Martinson과 Thomas 2005). 우리나라 환경부에서는 빗물이용시설 설치·관리 가이드 북을 통하여 본 연구의 초기 쓰림량에 해당하는 초기 빗물을 “대상 지역의 강우량을 누적유출고로 환산하여 최소 5 mm 이상의 강우량”으로 정의하고 있으며, 빗물이용시설 사용 시 이를 배제하도록 권고하고 있다(Ministry of Environment, Korea 2010). 이에 따라 본 연구에서는 강우사상 사이에 3일 이상의 무 강우일을 가진 강우사상의 강우량 중 초기의 5 mm가 초기쓰림량으로 발생된다고 가정하였다.

3.2.4 물 수요량 산정

물 수요량을 산정하기에 앞서, 먼저 빗물이용시설을 통해 집수된 물을 어떠한 용도로 사용할 수 있는지에 대한 정의가

필요하다. 우리나라의 경우 빗물이용은 물의 재이용 범위 내에서 해석되고 있으며, 물 재이용수에 대한 용도별 수질기준과 시범구역의 집수면을 거친 빗물의 수질을 비교하여 수질기준에 만족하는 용도에 대하여 이용할 수 있을 것이다. 하지만 본 연구의 경우 양호한 수질의 빗물을 획득하기 위하여 초기 슬립량을 고려하고 있으며, 연구 목적이 빗물이용시설을 통해 집수된 물의 사용 가능한 용도에 대한 신뢰도를 평가하는 것이기 때문에 각 용도별 수질기준에 대한 세부적인 분석을 하기보다는 기존 연구 결과를 종합하여 저장된 빗물의 용도를 정의하고자 하였다. 기존 연구들을 분석한 결과, 공통적으로 지붕면을 통해 집수된 빗물이 화장실용수, 조정용수, 청소용수의 수질기준을 충족시키는 것으로 나타났으며 이 3가지 용도로 집수된 빗물을 활용하는 것으로 가정하였다(Kim, 2001; Kim, 2007; Hong, 2009).

본 신뢰도 평가모형의 물수요량 매개변수는 앞서 정의한 빗물이용시설의 용도와 시범구역의 용도별 물 수요량을 토대로 산정하게 된다. 상수도 시설기준(Korea Water and Wastewater Works Association 2004)에 따르면 용도별 물 수요량은 생활용수의 사용목적별 구성비를 통해 산정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 부산광역시 상수도 통계연보(Busan Water Authority 2011)의 물 사용량 자료를 조사 및 분석하여 시범구역 내 월별 1인 1일 물 사용량을 산정하고 비교적 최근에 수행된 실측자료 기반의 사용목적별 구성비를 제시한 Kim *et al.*(2008)의 자료를 참고하여 용도별 물 수요량을 산정하였다. Kim *et al.*(2008)에 따르면 1인당 1일 총 가정용수 사용량 152.6 L이며, 그 중에서 세면기용수는 15.4 L(10.1%), 욕조용수는 24.7 L(16.2%), 싱크대용수 29.7 L(19.5%), 세탁기용수 30.8 L(20.2%), 화장실용수 38.5 L(25.2%), 기타용수 13.5 L(8.9%)임을 제시하였다. 이 중 기타용수는 발코니, 베란다, 단독주택의 옥외용수로서 본 연구에서는 이를 청소용수와 조정용수로 가정하였다.

본 연구의 빗물 수요량 관련 매개변수를 산정하기 위해서는 시범구역의 단독 주택 건물 1동 내에 거주하고 있는 인구수에 대한 자료가 필요하며 단독 주택 건물 1동에 1가구가 거주하는 것으로 가정하여 통계청 자료(2010년 기준)를 토대로 산정하였다. 산정 결과 부산광역시 사하구 내 단독주택에 거주하는 전체 인구수는 92,086명, 가구수는 19,829가구이며 1가구당 4.64명이 거주하는 것으로 조사되었다. 상기 내용을 바탕으로 분석한 시범구역의 용도별 물 수요량 매개변수 값은 Table 2에 나타내었다.

3.3 신뢰도 평가 결과

본 연구에서는 부산광역시 사하구 감천 2동에 위치한 단독 주택 건물들을 대상으로 앞서 산정한 용도별 물 수요량 매개변수를 총 4가지 시나리오로 구성하여 신뢰도를 평가하였다. 시나리오 1의 경우는 빗물이용시설을 통하여 집수된 빗물을

Table 2. Results of Parameter Estimation for Monthly Water Demand in Household

Month	Toilet (m ³ /family/day)	Landscaping and washing (m ³ /family/day)	Total water demand (m ³ /family/day)
Mean	0.185	0.065	0.732
Jan.	0.175	0.061	0.695
Feb.	0.188	0.066	0.746
Mar.	0.162	0.057	0.643
Apr.	0.170	0.060	0.676
May	0.167	0.059	0.662
Jun.	0.182	0.064	0.721
Jul.	0.188	0.066	0.744
Aug.	0.201	0.070	0.796
Sep.	0.216	0.076	0.856
Oct.	0.199	0.070	0.788
Nov.	0.194	0.068	0.769
Dec.	0.175	0.062	0.695

화장실 용수만으로 사용하는 경우, 시나리오 2는 조정 및 청소 용수만으로 이용하는 경우, 시나리오 3은 화장실 용수와 조정 및 청소 용수로 이용하는 경우, 시나리오 4는 총 물수요량을 빗물로 충당하는 경우를 의미한다. 각 시나리오별 물 수요량은 신뢰도의 계절적 변동성을 평가하기 위하여 월별로 산정되며 이 시나리오에 대한 빗물이용시설의 신뢰도 곡선은 다음과 같다(Fig. 5).

Fig. 5의 결과를 보면 일반적으로 배수면적이 증가함에 따라 동일한 강우사상에 대해서 더 많은 양의 빗물을 집수할 수 있기 때문에 신뢰도가 높게 나타나며, 배수면적이 일정할 경우 저장탱크용적이 증가할 때 신뢰도 또한 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만 저장탱크용량이 크다고 해서 신뢰도가 계속 증가하지는 않는다는 것을 알 수 있으며, 이러한 경향은 특히 배수면적이 작은 경우 두드러지게 나타난다. 이러한 결과는 특정 건물에 지붕빗물이용시설을 설치할 경우 해당 지역의 물수요량과 강수량 특성에 따라 해당 건물의 배수면적, 즉 지붕 면적이 신뢰도 평가에 제한요소로 작용하게 되는 것을 의미하며, 따라서 실제 빗물이용시설의 설계 시 적절한 저장탱크용량 범위가 존재함을 의미하게 된다.

물 수요량에 대하여 분석해 본 결과, 물 수요량이 가장 낮은 시나리오 2의 경우 배수면적이 100 m²(약 30평) 일 때 용량이 4 m³인 저장탱크를 설치한다면 97.0 %의 신뢰도를 얻을 수 있는 것으로 나타났으나, 물 수요량이 가장 높은 시나리오 4의 경우 용량이 4 m³인 저장탱크를 설치할 경우 29.4%, 22 m³인 저장탱크를 설치한다고 해도 41.8%의 신뢰도를 얻는 것으로 나타났으며, 결국 물 수요량이 증가함에 따라 신뢰도가 낮아지고 물 수요량이 감소할수록 신뢰도가 높게 산정되는 것

(a) Scenario 1(toilet flushing demand)

(b) Scenario 2(landscaping and washing demand)

(c) Scenario 3(toilet flushing demand + landscaping and washing demand)

(d) Scenario 4(total water demand)

Fig. 5. Reliability Assessment Results for Each Scenario.

을 확인할 수 있었다.

이처럼 동일한 강우사상을 대상으로 했을 때 지붕면적의 증가, 저장탱크 용량의 증가, 물 수요량의 감소에 따라 신뢰도가 높게 산정되는 것은 본 모형의 신뢰도 계산 방법이 물수지식을 이용한다는 점을 생각해 보았을 때 당연한 결과일 수 있을 것이다. 하지만 일반적으로 지붕빗물이용시설을 설계하는 시점에서 지붕면적과 물 수요량은 이미 정해져 있는 값이기 때문에 상기 신뢰도에 대한 정량적인 결과는 최적의 저장탱크 용량을 결정하는데 있어 유용한 정보를 산출할 수 있을 것으로 기대된다.

빗물이용시설을 설계하는데 있어 강우량은 가장 중요한 입력요소로서 저장되는 빗물의 양을 결정하게 되며, 우리나라와 같이 계절별 강우량 변동성이 큰 지역의 경우 신뢰도 또한 계절별 변동성을 고려할 필요가 있다. 또한 강우량에 대응하는 주요 출력요소인 물 수요량 역시 계절별로 상이한 값을 지닐 수 있으며, 보다 정확한 신뢰도의 계절성을 분석하기 위해서는 월별 물 수요량을 고려할 필요성이 있다. 따라서 본 연구에서는 월별 물 수요량의 변화가 특정 지붕빗물이용시설의 신뢰도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 일반 가정에서의 빗물이용시설에 용이하게 설치할 수 있는 2 m³ 규모의 저장탱크를 지붕배수면적이 100 m²인 단독주택에 설치한 경우를

가정한 후 월별 신뢰도를 산정해 보았다. 이 때, 집수된 빗물은 빗물의 용도별 수질기준을 적용해 보았을 때 가장 활용가능성이 높을 것으로 기대되는 화장실 용수로만 이용하는 것으로 설계하였다. Fig. 6은 상기 설계조건에서 30년간의 총 300개 강우시나리오에 대한 신뢰도 평가 결과를 상자수염도로 나타낸 결과이며, Table 3은 각 시나리오별 월평균 강우량과 신뢰도를 ensemble average하여 나타낸 것이다. 모의된 신뢰도를 분석한 결과, 부산광역시 사하구 감천 2동에서 지붕배수면적이 100 m²인 건물에 2 m³ 용량의 저장탱크를 설치하여

Fig. 6. Monthly Variability in RWH System Reliability(Roof Area : 100 m², Storage Tank Volume : 2 m³).

Table 3. Comparison Among Monthly Rainfall, Reliability, and Water Demand

Month	Rainfall (mm/month)	Reliability (%)	Water demand (Toilet) (m ³ /family/day)
Jan.	30.26	31.72	0.175
Feb.	47.45	42.49	0.188
Mar.	87.70	71.97	0.162
Apr.	131.54	79.80	0.17
May	157.07	83.69	0.167
Jun.	204.30	80.97	0.182
Jul.	316.81	91.99	0.188
Aug.	245.17	83.98	0.201
Sep.	157.93	74.14	0.216
Oct.	69.38	49.28	0.199
Nov.	44.76	38.53	0.194
Dec.	27.67	27.51	0.175

집수한 빗물을 화장실 용수로만 이용할 경우 연평균 62.3%의 신뢰도를 나타내는 것으로 나타났으며, 월별 신뢰도는 27.5~95.0%의 범위로 강우량이 많은 여름과 가을철에 높게 나타나고 비교적 강우량이 적은 봄과 겨울철에 낮게 나타나는 경향을 띄고 있음을 확인 할 수 있다. 그러나 주목할 만한 점은 월별 신뢰도가 강우량의 계절적 변동성의 영향뿐만 아니라 물 수요량의 계절적 변동성의 영향을 받기 때문에 그 분포 양상이 관측 강우량과 완전히 일치하는 것은 아니라는 점이다.

Table 3에서 나타났듯이 5월과 8월의 월평균 강우량은 각각 157.07 mm와 245.17 mm로써 8월이 5월 보다 월평균 강우량이 88.1 mm가 더 많으나 8월의 경우 5월에 비하여 일 평균 물 수요량이 0.034 m³ 더 많기 때문에 상쇄효과가 발생하고 신뢰도는 거의 유사한 값을 지니는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 계절적 변동성을 고려한 신뢰도를 평가하기 위해서는 해당 지역의 강우특성과 함께 물 수요량 역시 계절적 변동성을 고려하여 산정해야 함을 시사하며 본 연구에서 제시한 물 수요량 매개변수 산정 방법이 보다 정확한 신뢰도 평가에 기여할 수 있음을 나타낸다.

5. 결 론

본 연구에서는 빗물이용시설 신뢰도 평가모형의 국내 적용성을 높이하고자 현재 국내에서 획득 가능한 자료를 토대로 모형의 매개변수를 산정할 수 있는 방법을 제시하였으며 이를 통해 부산광역시 내 시범구역의 연평균 신뢰도 및 신뢰도의 계절성을 분석하였다.

신뢰도 평가모형을 적용할 시범구역의 선정은 먼저 빗물이용시설의 설치 목적인 갈수지역 용수 공급과 강우유출수 저

감 및 재사용을 고려하여 상수도 미급수지역과 단독주택밀집지역, 지형특성, 경제적 능력을 선정 기준으로 정한 뒤 부산광역시 내 행정구역별로 자료를 수집 및 분석하여 결정하고자 하였으며, 그 결과 부산광역시 사하구 감천2동을 시범구역으로 선정하였다.

신뢰도 평가모형의 매개변수는 지붕면적, 빗물이용시설 저장탱크용량, 초기 쓸림특성, 수요특성에 따른 용도별 물 수요량으로 구성된다. 현재 국내에서는 빗물이용시설을 설치할 수 있는 지붕 면적에 대한 자료가 없기 때문에 본 연구에서는 그에 대한 대안으로 1:1000 수치지형도에서 단독주택 레이어를 추출하여 산정하고자 하였으며, 시범구역 내 전체 단독주택 지붕면적의 99.4%를 차지하고 있는 1~175 m²의 범위를 지붕면적 매개변수로 설정하였다. 저장탱크용량 매개변수는 현실적인 설치가능성을 고려하기 위하여 현재 시중에서 판매되고 있는 탱크 용량과 시범구역의 1가구당 월 평균 물사용량을 조사분석하여 1~22 m³으로 설정하였다. 또한 초기 쓸림특성은 빗물이용시설의 용수에 적합한 수질을 유지하고자 강우사상 사이에 3일 이상 무 강우일을 가진 강우사상의 강우량 중 초기 5 mm가 초기 쓸림량으로 발생하는 것으로 설정하였다. 물 수요량 매개변수는 집수된 빗물의 용도를 화장실용수, 조정용수, 청소용수로 정의한 후 단독주택 1동에 1가구가 거주하는 것으로 가정하여 시범구역의 1인 1일 평균 물사용량과 가정용수의 사용목적별 구성비, 1가구 당 평균 인구수를 통해 월별로 산정하였다. 그 결과 평균적으로 0.185 m³/가구/일(화장실용수), 0.065 m³/가구/일(조정 및 청소용수), 0.732 m³/가구/일(총 물수요량)인 것으로 나타났다.

본 연구에서는 빗물의 이용용도에 따라 총 4가지 시나리오(① 화장실 용수, ② 조정 및 청소용수, ③ 화장실 용수 + 조정 및 청소용수, ④ 총 물수요량)에 대한 신뢰도를 평가하였다. 그 결과 지붕면적과 저장탱크용량이 증가할수록, 물 수요량이 감소할수록 신뢰도가 높게 산정되었다. 이러한 결과는 본 모형이 신뢰도를 물수지식을 통해 산정한다는 점을 고려하면 당연한 결과일 수 있으나, 각 매개변수 범위에 대한 신뢰도의 정량적인 결과를 제시함으로써 최적의 빗물이용시설 설계 방안에 대한 유용한 정보를 산출할 것으로 기대된다.

본 연구에서 제시한 매개변수, 특히 월별 물 수요량 매개변수가 신뢰도의 계절적 변동성에 미치는 영향을 판단하고자 시범구역 내 지붕배수면적 100 m²이고 저장탱크용량이 2 m³인 빗물이용시설이 설치된 단독주택의 신뢰도를 평가해 보았다. 그 결과, 월별 신뢰도는 27.5~95.0%의 범위로 여름과 가을철에 높게 나타나고 봄과 겨울철에 낮게 나타나 시범구역의 월평균 강우량 패턴과 유사한 것을 확인할 수 있었다. 하지만 강우량뿐만 아니라 물 수요량 역시 계절별 변동성을 가지며, 때문에 강우량의 증가분에 대하여 물 수요량의 증가가 신뢰도의 상쇄효과를 유발하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 본 연구에서 제시한 물 수요량 매개변수 산정 방법

이 보다 정확한 신뢰도 평가에 기여할 수 있음을 나타낸다.

본 연구는 국내에서 쉽게 수집 가능한 자료를 토대로 신뢰도 평가모형의 매개변수를 산정함으로써 국내 실정에 적합한 빗물이용시설 설계방안을 제시하고 다양한 빗물이용시설 특성에 대한 정량적인 신뢰도 및 효율성 평가 자료를 제공함으로써 빗물이용시설 설치 시 발생하는 효과에 대한 정보를 제공하는 데에 그 의의가 있다. 다만, 본 연구의 경우 기존의 연구 보고서 및 논문, 기초 통계자료를 수집 및 분석하여 매개변수를 산정하였기 때문에 일반적인 적용성 분석과 의사결정 단계에서의 활용도는 충분히 높다고 하겠으나, 개별적인 사례에 대한 세부적인 설계방안수립에 활용하기 위해서는 오차가 발생할 가능성이 있기 때문에 빗물의 수질특성, 초기 쓸림 특성, 용도별 물 사용량 등에 대한 실측 기반의 자료를 구축하여 매개변수를 산정할 필요가 있다. 또한 빗물이용시설의 보급 확대를 위해서는 시설의 설치 및 유지비용과 수명 대비 빗물 이용에 따른 상수도 비용 절감 효과 등을 고려한 경제성 분석에 대한 연구 역시 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업 [NEMA-자연-2011-45] 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다

References

- Ahn, J.H., Lee, J.H., Jee, Y.K., and Kim, J.H. (2011) *Water Reuse Policy Development for Urban Instream Flow Augmentation*, Report, Korea Environment Institute.
- Busan Water Authority (2011) *Statistics of Waterworks in Busan*, Annual report.
- Basinger, M., Montalto, F., and Lall, U. (2010) A rainwater harvesting system reliability model based on nonparametric stochastic rainfall generator, *J. Hydrology*, Vol. 392, pp. 105-118.
- Choi, C.H., Park, M.J., Baek, C.W., and Kim, S.D. (2011) Application of Rainwater Harvesting System Reliability Model Based on Non-parametric Stochastic Daily Rainfall Generator to Haundae District of Busan, *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol. 27, No. 5, pp. 634-645.
- Cowden, J.R., Watkins, D.W., and Mihelcic, J.R. (2008) Stochastic rainfall modeling in West Africa: parsimonious approaches for domestic rainwater harvesting assessment, *J. Hydrology*, Vol. 361, pp. 64-77.
- Ghisi, E. (2006) Potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of Brazil, *Building and Environment*, Vol. 41, pp. 1544-1550.
- Guo, Y. and Baetz, B.W. (2007) Sizing of rainwater storage units for green building applications, *J. Hydrologic Engineering*, pp. 197-205.
- Han, M.Y. (2003) *A Policy Research for Expanding Supply of Rainwater Harvesting Systems*. Report, Ministry of Environment, Korea.
- Han, M.Y. and Kim, Y.W. (2004) Outline and Economical Valuation of Rainwater Utilization Facility in SNU Dormitory, *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 18, No. 5, pp. 547-557.
- Han, Y.H., Choi, Y.K., and Lee, T.G. (2005) *Maintenance of Water Cycle for Ecological Urban Development: Focusing on Decentralized Rainwater Management*. Report, Korea Research Institute For Human Settlements.
- Herrmann, T. and U Schmida (1999) Rainwater utilization in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects, *Urban Water*. Vol. 1, pp. 307-316.
- Hong, S.H. (2009) *A Study on the Reasonable Adjustment Plan of Water Quality Standards for Reclaimed Water for Invigorating Water Reuse*. Report, Ministry of Environment, Korea.
- Jee, H.K. (2003) *The Development of Rainwater Utilizing System for Domestic Water at Agricultural and Fishing District*. Report, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Korea.
- Kang, W.G., Chung, E.S., Lee, K.S., and Oh, J.H. (2010) Estimation of Storage Capacity for Sustainable Rainwater Harvesting System with Probability Distribution, *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol. 26, No. 5, pp. 740-746.
- Keem, M.S., Ko, I.W., and Kim, S.D. (2009) An Analysis of the Effect of Climate Change on Nakdong River Flow Condition using CGCM's Future Climate Information, *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol. 25, No. 6, pp. 863-871.
- Kim, C.K. (2011) A Study on the Rainwater Quality Monitoring and the Improvement, Collection and Storage System, *CLEAN TECHNOLOGY*, Vol. 17, No. 4, pp. 353-362.
- Kim, H.S., Lee, D.J., Kim, J.W., and Jung, K.S. (2008) End-use Analysis of Household Water by Metering, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 5B, pp. 595-601.
- Kim, R.H. (2004) *21st Century Frontier R&D Program -Sustainable Water Resources Research Program- Technology for Rainwater Storage and Utilization*. Report, Ministry of Science and Technology, Korea.
- Kim, Y.L. (2007) *Manual for Implementation and Maintenance of the Rainwater and Infiltration Facilities*. Report, Seoul Development Institute.
- Korea Water and Wastewater Works Association (2004) *Water Supply Facilities Standards*, Ministry of Environment, Korea.
- Lee, B.K. (2006) *A Study on the Establishment of Comprehensive Countermeasures for Water Demand Side Management*. Report, Ministry of Environment, Korea.
- Lee, C.S., Jee, H.K., Jeong, K.O., Kim, J.W., and Choi, H. (2002) Water Quality Analysis of First Flush Rainwater for the Effective Usage of Harvested Rainwater, *Proceedings of the Korean Environmental Sciences Society Conference*, Vol. 11, No. 1, pp. 215-216.
- Lee, K.W., Lee, C.H., Yang, M.S., and Yu, C.C. (2000) Probabilistic Design of Storage Capacity for Rainwater Cistern Systems, *J. Agricultural Engineering Research*, Vol. 77, No. 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.
- Ministry of Environment, Korea (2010) *A Guidebook for the Implementation and Management of Rainwater Harvesting Systems*. Report.
- Mun, J.S. and Han, M.Y. (2009) An Economical Analysis of the Rainwater Harvesting(RWH) System at the S Residential and Commercial Complex. *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 25, No. 12, pp. 173-181.
- STATISTICS KOREA homepage, <http://www.kostat.go.kr>
- Song, M.Y. (2012) *Supplementary Proposal to Promote Rainwater Utilization in Gyeonggi Province*. Report, Gyeonggi Research Institute.
- Su, M.D., Lin, C.H., Chang, L.F., Kang, J.L., and Lin, M.C. (2009) A probabilistic approach to rainwater harvesting systems design and evaluation, *Resources, Conservation, and Recycling*, Vol. 53, pp. 393-399.
- Texas Water Development Board. (2005) The Texas Manual on Rainwater Harvesting, Accessd online at Http://www.twdb.state.tx.us/publications/reports/RainwaterHarvestingManual_3rdedition.pdf
- Yoo, C.S., Kim, K.J., and Yun, Z.W. (2008) Hydrological Evaluation of Rainwater Harvesting: 1. Hydrological Analysis. *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol. 24, No. 2, pp. 221-229.

Received ■ February 27, 2014

Revised ■ February 28, 2014

Accepted ■ March 6, 2014