

# 확률분포를 이용한 빗물이용시설의 저류용량 산정

## Estimation of Storage Capacity for Rainwater Harvesting System with Probability Distribution

이길성\*, 강원구\*\*, 정은성\*\*\*, 송재열\*\*\*\*

Kil Seong Lee, Won Gu Kang, Eun-Sung Chung, Jae Yeol Song

### 요 지

수자원의 근간이 되는 빗물의 효율적 사용을 위하여 최근 우리나라도 빗물이용시설(Rainwater Harvesting System, RHS)이 많이 도입되고 있는 실정이다. 이런 RHS의 효율적인 설계 및 유지관리를 위해서는 해당 건물의 물 사용량과 집수되는 빗물의 양이 고려된 적정 저류용량 산정이 필수적이다. RHS의 적정 저류용량 산정을 위해서는 강수량에 따른 저류용량과 부족량의 확률적 관계를 제시하는 것이 중요하다. 이에 강우와 물 사용량의 실측값을 이용하여 저류용량에 따른 부족률을 도출하는 모의모형을 구축하였으며, 그 결과를 통하여 저류용량과 부족률간의 관계를 확률분포로 제시하였다. 적용대상은 서울대학교 34동이며 적합 확률분포로는 Generalized Logistic 분포임을 검증하였고 재현기간에 따른 저류용량별 부족률을 제시하였다. 그 결과 18 m<sup>3</sup> 이상의 저류용량을 가지는 RHS 설치의 재현기간을 막론하고 효율성이 없음을 판단하였다. 본 연구를 통해 구축된 모의 모형과 재현기간에 따른 저류용량별 부족률은 RHS의 설계와 의사결정에 관련된 이해당사자들의 직관적 판단 도구로 활용이 가능할 것이다. 향후, 좀 더 신뢰성 있는 자료를 산정하기 위해서는 일강우량에 따른 일화장실 물사용량의 실측자료를 모의 모형에 적용시켜야 할 것이다.

**핵심용어:** 빗물이용시설, 확률분포, 부족률, 저류용량, Generalized Logistic 분포

### 1. 서 론

기상이변으로 인한 물부족 사태가 심화되면서 빗물(rainwater)을 화장실 용수, 정원수, 연못과 호수 등의 수원 등으로 사용하는 사례가 증가하고 있다. 이러한 용도의 빗물 사용을 위해서는 일정 저류용량을 갖는 빗물이용시설(Rainwater Harvesting System, RHS)이 설치되어야 한다.

RHS의 용량을 산정하는 기존의 연구(Jenkins and Lund, 2000; Zhang and Cai, 2003; Wei et al., 2005; 유철상 등, 2008)는 고정된 저류용량(storage capacity)하의 물수요량 대비 부족량(deficit)의 변화량을 표현하거나 저류용량이 변화됨에 따른 평균 부족량을 나타냄으로서 특정 저류용량에 따른 부족량 혹은, 특정 부족량에 따른 저류용량만을 알 수 있었다.

따라서 본 연구는 저류용량별 부족률에 대한 적합확률분포를 통하여 비초과확률을 산정하고

\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수 · 공학박사 · E-mail: [kilselee@snu.ac.kr](mailto:kilselee@snu.ac.kr)

\*\* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 석사과정 · 발표자 · E-mail: [safewater@snu.ac.kr](mailto:safewater@snu.ac.kr)

\*\*\* 정회원 · 한양대학교 공과대학 교육전담교원 · 공학박사 · E-mail: [ces825@hanyang.ac.kr](mailto:ces825@hanyang.ac.kr)

\*\*\*\* 서울대학교 건설환경공학부 석사과정 · E-mail: [sjyeol84@snu.ac.kr](mailto:sjyeol84@snu.ac.kr)

적합확률분포의 분위치(quantiel)을 이용하여 저류용량에 따른 부족량을 표현하고자 한다. 적용대상은 서울대학교 공과대학 34동 건물이며 물수요량은 서울대학교 기술과가 실측한 2008년 서울대학교 34동의 월 물사용량 자료를 사용하여 일별 가중치를 고려한 일일 화장실 용수 사용량으로 변환하였으며 물공급량은 적용대상과 가장 가까운 강우관측지점인 구로 관측소의 1986년부터 2008년까지의 일강우량 자료를 활용하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 저류용량에 따른 부족률 모의 모형

저류용량에 따른 부족률을 산정하기 위하여 일정시간 간격으로 RHS로 유입되는 물의 양과 유출되는 물의 양이 결정되어야 한다. 본 연구는 Su et al. (2009)이 제안한 절차를 수정한 그림 1과 같은 모형을 이용하여 저류용량별 부족률을 산정하였다. 본 모형에서  $t$  는 일(day)이며  $R$  (cms)은 방류량,  $I$  (cms)는 유입량,  $D$  (cms)는 물수요량,  $S$  (cms)는 저류조의 물의 양이다. 모형에서도 출된  $t$  일의 부족량( $Def_t$ )은  $D_t$ 와  $R_t$ 의 차이에 의해서 결정된다. 연간 부족률( $DR$ )은

$$DR = \frac{\sum Def_t}{\sum D_t} = \frac{\sum (D_t - R_t)}{\sum D_t}$$

와 같이 총 수요량 대비 총 부족량의 값으로 나타낼 수 있다.

### 2.2 저류용량에 따른 부족률 확률 모형

저류용량에 따른 부족률 모의 모형의 결과에 적합한 확률분포를 산정한 후, 부족률을 해당 분포의 누적분포함수(CDF)에 적용하여 초과확률(exceedance probability)을 구한다. 초과확률 개념으로 나타낸 부족률은 자칫 저류용량이 증가함에 따라 물 부족량 역시 증가하는 것과 같은 인식상의 오류를 유발하므로 RHS의 설계를 담당하는 엔지니어와 설치를 관할하는 의사결정권자들에게 직관적인 도구로 제시되기 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 적합 확률분포의 역누가분포함수(inverse CDF)를 산정하여 저류용량에 따라 물이 부족해질 확률을 비초과확률(non-exceedance probability)로 나타내었고 재현기간(return period)의 개념을 적용시켜 기존의 방법 보다 명확한 방법을 제시하였다.

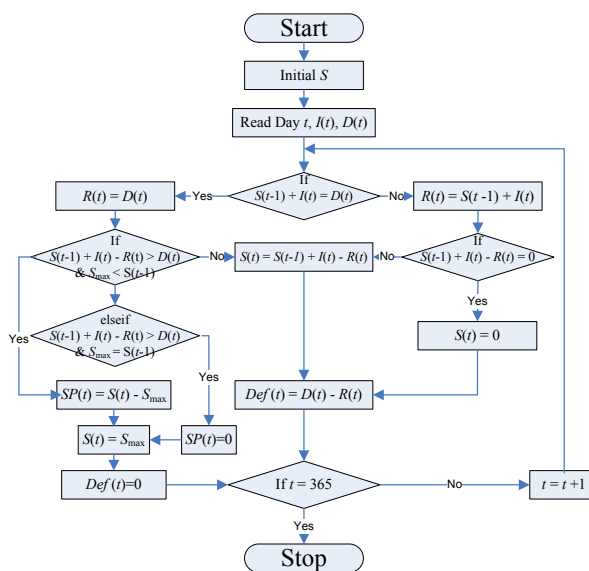


그림 1. 저류용량에 따른 부족률 모의 모형

### 3. 적용 대상의 자료 선정

그림 1에 제시된 서울대학교 34동은 연구실과 강의실만으로 이루어진 건물이므로 화장실 사용 빈도는 평일이 주말에 비해 높을 것이다. 본 연구에서는 실측된 월별 물사용량에 월~목요일은 0.175, 점차 화장실 사용 빈도가 줄어드는 금요일은 0.15, 그리고 토요일, 일요일은 0.09, 0.06으로 일주일 대비 일별 가중치를 적용하였다. 또한 대상건물로 유입되는 빗물량을 산정하기 위한 유출 계수는 DIN 1989-1:2001-10 (Fachvereinigung and Regenwassernutzung, 2001)에 제시된 0.8로 선정하였다.

### 4. 모형의 적용결과

#### 4.1 최적 확률분포의 선정

저류용량별 부족률의 적합 분포를 선정하기 위하여 Normal, Lognormal, Gumbel, Logistic, Gamma, Pareto, Weibull, GEV, Gen. logistic, Log-pearson type III의 10개의 확률분포를 이용하여 최적분포를 채택하였으며, K-S 검정과  $\chi^2$  검정으로 적합도 검정을 실시하였다. 그 결과 최적 분포로 Generalized Logistic 분포가 선정되었다(표 1).

최적분포로 선정된 Generalized Logistic 분포의 CDF는

$$F(x) = \begin{cases} \frac{1}{1 + (1 + \kappa z)^{-1/\kappa}} & \kappa \neq 0 \\ \frac{1}{1 + \exp(-z)} & \kappa = 0 \end{cases}$$

이며 여기서,  $\kappa$ 는 형상(shape) 매개변수,  $z$ 는  $(x - \mu)/\sigma$ ,  $\sigma(>0)$ 는 규모(scale) 매개변수,  $\mu$ 는 위치(location) 매개변수이다. 위 식을 이용하여 저류용량에 따른 부족률(DR)의 초과확률 곡선을 그림 2와 같이 제시하였다.

#### 4.2 재현기간에 따른 부족률과 저류용량의 관계

저류용량에 따른 부족률을 확률분포로 표현함으로써 부족률을 재현기간으로 나타낼 수 있다. 재현기간( $T$ )은

$$T(\text{yr}) = \frac{1}{1 - F(x)}$$

와 같이 표현할 수 있으며 그 결과는 그림 3과 같다.

표 1. 저류용량별 부족률의 적합 분포

RHS Storage Capacity (m <sup>3</sup> )	Deficit Rate		Fitted Probability Distribution		Goodness-of-fit Test	
	Mean	Std. Dev.	1st	2nd	K-S	$\chi^2$
1	0.586	0.060	Gen. Logistic	GEV	Pass	Pass
1.5	0.518	0.068	Gen. Logistic	Logistic	Pass	Pass
2	0.465	0.073	Gen. Logistic	Weibull	Pass	Pass
3	0.385	0.082	GEV	Gen. Logistic	Pass	Pass
5	0.283	0.089	Gen. Logistic	Log-pearson III	Pass	Pass
10	0.172	0.084	Lognormal	GEV	Pass	Pass
15	0.133	0.080	GEV	Normal	Pass	Pass
20	0.120	0.077	GEV	Gen. Logistic	Pass	Pass
Optimum Probability Distribution			Generalized Logistic			

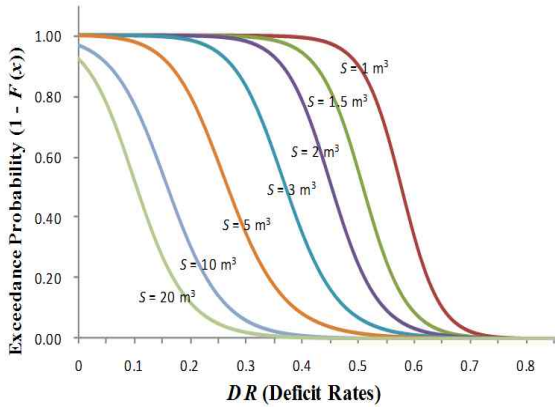


그림 2. 저류용량별 부족률의 초과확률 곡선

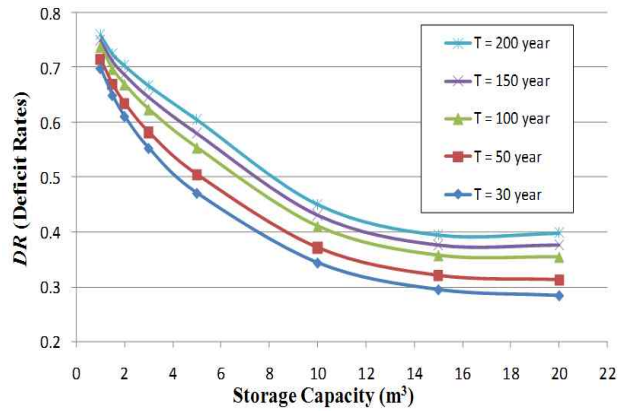


그림 3. 재현기간에 따른 저류용량별 부족률

## 5. 결론 및 고찰

본 연구는 RHS의 설치 대상에 따른 적정 저류용량 산정을 위하여 저류용량에 따른 부족률을 모의하고 그 결과를 확률분포에 적용시켜 재현기간에 따른 저류용량별 물 부족량을 산정하였다.

적용대상은 연구실과 강의실로 구성되어 있는 서울대학교 34동 건물이며 강우자료는 구로강우 관측소의 1986년부터 2008년까지 일강우량을 사용하였다. 일일 화장실 물사용량은 관측된 월별 물 사용량에 일일 가중치를 적용시켜 도출하였다. 적용결과, 저류용량별 부족률의 표현에는 Generalized Logistic 분포가 적합함을 검증하였으며 부족률의 CDF와 비초과확률 개념을 이용하여 재현기간에 따른 저류용량별 부족률을 산정하였다 그 결과 부족률의 재현기간이 증가함에 따라 특정 저류용량에서 부족률이 커짐을 알 수 있으며 재현기간에 상관없이 저류용량이 18 m<sup>3</sup>이상이 되면 부족률이 더 이상 커지지 않는 경향을 보이고 있다. 따라서 서울대학교 34동의 경우 18 m<sup>3</sup>이상의 저류용량을 가지는 RHS를 설치하는 것은 효율성이 없음을 알 수 있다.

기존의 연구가 고정된 저류용량 하의 물수요량 대비 부족량을 표현하거나 저류용량이 변화됨에 따른 평균 부족량을 나타냄으로서 저류용량과 부족량의 연속성을 간과한 반면 본 연구는, 저류용량에 따른 부족률을 확률분포를 통해 구현함으로써 연속 형식의 저류용량에 따른 부족률을 표현하였을 뿐만 아니라 재현기간 개념을 적용함으로써 RHS의 설계와 관련된 기술자나 설치를 관할하는 의사결정권자들을 이해시키는데 보다 직관적인 방법을 제시하였다는 것이 의의이다.

향후 좀 더 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해서는 일강우량에 따른 일화장실 물사용량을 측정할 자료를 이용하여 모의 모형을 적용하여야 할 것이며 미래의 기후변화가 고려된 RHS의 저류용량 산정 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 서울대학교 공학연구소를 통한 21세기 프린티어 연구개발 사업인 "수자원의 지속적 확보기술개발 사업단(과제번호 1-7-3)"과 서울대학교 SIR BK21(안전하고 지속가능한 사회기반시설) 사업단의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참 고 문 헌

1. 유철상, 김경준, 윤주환 (2008). “빗물이용의 수문학적 평가: 1. 수문해석.” **수질보전 한국물환경학회지**, 제 24권, 제 2호, pp. 221-229.
2. Fachvereinigung, B., and Regenwassernutz-ung, E.V. (2001). *Rain Water Harvesting Systems - Part 1: Planning, Installation, Operation and Maintenance*. DIN 1989-1:2001-10, Berlin, Germany, p. 26.
3. Jenkins, M.W., and Lund, J.R. (2000). “Integrating Yield and Shortage Management Under Multiple Uncertainties.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 126, No. 5, p. 288 - 297.
4. 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, p. 393 - 399.
5. Wei, H., Li, J.L., and Liang, T.G. (2005). “Study on the Estimation of Precipitation Resources for Rainwater Harvesting Agriculture in Semi-arid Land of China.” *Agricultural Water Management*, Vol. 71, No. 1, p. 33 - 45.
6. Zhang, X.Y., and Cai, H.J. (2003). “The Development of the Model to Simulate and Optimize the Rainwater-harvesting System for Irrigation.” *Journal of Experimental Botany*, Vol. 54, p. 45 - 46.