

빗물이용의 수문학적 평가: 1. 수문해석

유철상·김경준*·윤주환*

고려대학교 건축·사회환경공학과

*고려대학교 환경공학과

Hydrological Evaluation of Rainwater Harvesting: 1. Hydrological Analysis

Chulsang Yoo · Kyoungjun Kim* · Zuhwan Yun*

Department of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Korea University

*Department of Environmental Engineering, Korea University

(Received 30 October 2007, Accepted 10 March 2008)

Abstract

This study revised a model for hydrologically analyzing rainwater harvesting facilities considering their rainfall-runoff properties and the data available. This model has only a few parameters, which can be estimated with rather poor measurements available. The model has a non-linear module for rainfall loss, and the remaining rainfall excess (effective rainfall) is assumed to be inflow to the storage tank. This model has been applied for the rainwater harvesting facilities in Seoul National University, Korea Institute of Construction Technology, and the Daejeon World Cup Stadium. As a result, the runoff coefficients estimated were about 0.9 for the building roof as a rainwater collecting surface and about 0.18 for the playground. This result is coincident with that for designing the rainwater harvesting facilities to show the accuracy of model and the simulation results.

keywords : Inflow, Long-term rainfall-runoff analysis, Rainwater utilization, Runoff coefficient

1. 서론

인구의 증가, 도시의 확장, 기타 기후변화 등의 원인으로 국가 전체적으로 또는 부분적인 아울러 연중 또는 일시적 물 부족이 이미 사회적인 큰 문제점으로 인식되고 있다 (Chilton et al., 1999; Ghisi et al., 2006; Thomas, 1998; Villarreal and Dixon, 2005). 이러한 상황을 극복하고자 하는 연구는 우리나라뿐만 아니라 외국의 여러 나라에서도 활발하게 진행되고 있다. 댐을 건설하여 가용 수자원을 확보하는 방법(건설교통부, 1990, 2000), 중수도를 설치하여 이용된 용수를 재처리한 후 이를 사용하는 방법(AI-Jayyousi, 2003; Christova-Boal et al., 1996; Nolde, 1999) 그리고 빗물저류조를 설치하여 빗물을 이용하는 방법(농림부, 2003; 대한상하수도학회, 2005; Appan, 1999; Fewkes, 1999a; Ghisi, 2006; Handia et al., 2003) 등이 이를 극복하고자 하는 대표적인 방법이라 할 수 있다. 이들 방법 중에서 최근 빗물이용시설을 이용하는 방법이 크게 대두되고 있는 상황이다.

우리나라에서도 대한상하수도학회(2003)의 ‘빗물이용시설 보급 확대를 위한 정책방안 연구’에서 빗물이용과 관련하여 다양한 추가 연구의 필요성이 제시된 바 있고, 최근 국

회에서 빗물이용시설의 설치대상 확대를 규정한 수도법 개정안이 제안되는 상황에 이르고 있다(대한상하수도학회, 2005). 또한 서울시에서는 주로 홍수기 과도한 직접유출을 규제하기 위하여 일정규모 이상의 건물에 대한 빗물저류 및 이용시설의 설치 의무화하는 조례를 통과시키기도 하였다. 그리고 민간단체, 환경단체 등에서는 빗물이용의 활성화를 요구하고 있는 상황이나, 반대로 대한상공회의소(2004)에서는 ‘빗물이용시설 활성화 방안의 문제점 및 개선 방안’을 발간하여, 빗물이용의 경제성 미흡, 상용화 기반미흡, 대체수자원으로서의 빗물 효용성에 대한 현실적 평가 결여, 산업계의 사업리스크 증가, 우리나라 강수량의 집중으로 인한 이용 효율성의 저하 등을 지적한 바 있다. 그 외에도 서울시정개발연구원(2003), 농림부(2003), 과학기술부(2004), 한무영과 김영완(2004) 등 빗물이용과 관련된 연구들이 활발하게 진행되고 있다.

그러나 이와 같은 빗물이용의 효과들은 빗물이용시설의 수문학적 특성을 모형화하여 정교한 분석을 실시한 후에야 비로소 평가될 수 있다(Ghisi et al., 2007). 실제로 Fewkes(1999a, 1999b)는 빗물이용시설의 분석을 위해서는 일 단위 모형의 필요성 주장한 바 있다. 그러나 지금까지의 대부분의 단순하게 강우총량에 일정유출계수를 적용하고 이를 잠재빗물이용량이라 추정하는 연구들이 대부분이다 (Chilton et al., 1999; Ghisi, 2006; Ghisi et al., 2006, 2007). 잠재빗물이용량을 기준으로 인구증가율을 고려한 용수의

* To whom correspondence should be addressed.

guitar77@korea.ac.kr

가용성을 평가하는 연구들도 일부 찾아볼 수 있다(Ghisi, 2006). 그러나 이러한 방법들은 대부분 월단위 또는 연단위의 해석을 실시하기 때문에 강우의 시간적인 특성을 잘 반영하지 못하고 따라서 사용될 수 있는 용수의 양을 정량화하지 못한다는 단점들을 가지고 있다. 빗물 사용량을 정확히 정량화하지 못한다면 빗물이용시설의 가장 중요한 부분을 차지하는 빗물저류조의 최적 용량을 결정하는 데에도 큰 지장을 초래한다(Lee et al., 2000). 더욱이 우리나라처럼 여름철에 연강우량의 대부분이 발생하는 강우의 계절성이 뚜렷한 경우에는 실제로 빗물이 이용될 수 있는 양과 빗물을 이용할 수 있는 일수의 추정은 더욱 모호해진다.

빗물이용시설을 분석하는데 있어서 또 하나의 문제점은 사용가능한 관측자료가 충분하지 않다는 점이다. 이러한 문제점은 우리나라뿐만 아니라 외국의 연구에서도 마찬가지이다(Wung et al., 2006). 보통 빗물이용시설의 평가를 위해서는 강우자료, 유입량 자료, 용수 이용량 자료, 빗물 이용량 자료, 지붕면적, 저류조 용량 등의 자료가 필요하다(Ghisi et al., 2007). 그러나 국내에서는 이러한 자료가 측정되고 있는 곳은 서울대학교 그리고 건설기술연구원의 빗물이용시설 등으로 매우 제한적이며, 대부분의 다른 시설에서는 수질관련 인자들이 주로 측정되고 있다(과학기술부, 2004; 한무영과 김영완, 2004). 따라서 빗물이용시설의 수문 해석을 위한 적절한 모형이 구성된다 하더라도 관측 자료의 부족으로 인한 문제점은 여전히 남게 된다.

본 연구에서는 먼저 빗물이용과 관련한 장기유출해석의 특성을 파악하여 이를 잘 반영할 수 있으며, 또한 가용한 자료의 정도를 고려하여 매개변수의 수가 적어 적용성을 제고할 수 있는 모형을 구성하고 이를 이용하여 대상시설에 대한 장기유출모의를 실시하고자 한다. 이러한 모의 결과를 바탕으로 실제 가능한 빗물의 양과 이용일수를 정량적으로 분석하는 것이 가능하다. 이와 같은 분석을 통해 얻을 수 있는 빗물 유입량, 빗물이용량, 빗물저류조의 저류량 자료는 특히 우리나라처럼 강우의 계절성이 큰 경우에 빗물의 실가용량과 이용일수의 정량화, 이를 통한 용수 질감량의 추정, 이 과정에 대한 경제성의 평가, 빗물저류조의 적정 크기를 결정 등의 자료로 이용될 수 있을 것이다. 추가로 빗물이용을 통하여 감감될 수 있는 홍수 유출량의 감소정도도 개략적으로 파악해 보고자 한다.

본 연구의 내용은 두 논문으로 구성하였다. 본 논문은 그 첫 번째 부분으로 주로 빗물이용시설에 대한 장기유출모의와 관련한 부분으로 구성하였다. 모형의 구성 매개변수 추정 및 유출모의가 본 논문의 주요내용이다. 이러한 유출해석을 근거로 한 추가의 분석은 본 연구의 두 번째 논문에서 정리하였다.

2. 연구방법

2.1. 빗물이용의 수문학적 해석 모형 구성

2.1.1. 장기유출해석

하천유역에서의 장기유출해석에는 강우, 증발산, 침투 및

침투, 지하수, 지표면유출 등의 다양한 수문순환성분들이 고려된다. 이러한 세부 과정들은 물리적으로(physically) 또는 개념적으로(conceptually) 모형화되어 하나의 장기 강우-유출해석모형을 구성하게 된다. 국내에서 사용하는 모형의 대부분은 개념적인 모형에 해당하며 관측된 물리적인 현상을 개념적으로 간단히 모형화한 것들이다. 대표적인 예로 미국에서 개발된 NWS-PC(Tabios et al., 1991), SWAT(Arnold et al., 1998), PRMS(Leavesley et al., 1983) 및 일본에서 개발된 Tank 모형(Sugawara et al., 1983) 등을 들 수 있다.

그러나 빗물이용과 관련한 강우-유출해석은 하천유역의 유출해석과는 큰 차이점을 갖는다. 그 차이점 및 기타 해석에서 중요하게 고려되어야 할 점 등은 정리하면 다음과 같다.

- (1) 먼저, 빗물 집수면은 하나의 작은 유역으로 가정하는 것이 가능하다. 아울러, 저장시설의 경우도 용량이 작은 하나의 저류지 정도로 가정하는 것이 가능할 것이다.
- (2) 일반적으로 빗물 집수면의 면적은 매우 작으며, 따라서 장기유출해석의 일반적인 시간단위인 일단위의 해석에서 지체시간은 반영되지 않는다. 즉, 당일 강우는 당일 유출로 탱크에 유입된다.
- (3) 자연유역에서와는 달리 강우에 대한 손실의 형태는 주로 증발의 형태로 나타난다. 일반적으로 빗물이용을 위한 집수면은 대부분이 건물의 옥상 또는 지붕으로 콘크리트 또는 기타 재료로 구성되어 있다. 따라서 우기인 여름철에 집수면의 온도가 대기보다 더 높을 수 있으며, 자연유역과 비교하여 더 많은 증발량을 나타낼 가능성이 크다.
- (4) 집수면에서는 침투에 의한 손실은 발생하지 않는다. 그러나 빗물의 이용에는 초기우수의 배제와 같은 과정이 추가되므로, 이를 침투과정과 유사하게 모의할 수 있다. 예를 들어 일정량의 초기우수를 단순 배제하는 경우, 또는 강우강도를 고려하여 일정한 비율로 우수가 배제하는 경우 모두 기존의 침투모형을 이용하여 모의가 가능하다.
- (5) 일단 침투된 강우가 다시 하천유출에 기여하게 되는 중간유출이나 지하수유출의 경우는 존재하지 않는다. 위에서 언급한 점들을 고려하면 빗물이용과 관련한 유출해석은 자연유역보다 훨씬 간단할 수 있다. 그러나 여전히 현 시점에서 다음과 같은 문제점을 지적할 수 있다.
 - (1) 관측자료의 빈곤으로 인한 모형 매개변수 추정의 문제점이다. 우리나라의 경우 빗물이용과 관련된 문제는 대부분 수질문제에 집중되어 있어 수문학적인 관측자료는 매우 적은 것으로 파악된다. 강우, 증발, 유입량, 이용량, 초기 우수배제량 등에 대한 체계적인 관측자료가 없으므로 현 시점에서의 분석은 그 한계를 가질 수밖에 없다.
 - (2) 인공 포장위에서의 증발량은 저수지나 하천 또는 자연유역에서의 평균적인 증발량에 비해 월등히 클 것으로 판단되나, 역시 관측된 자료가 적어 정확히 판단하기 어렵다. 현재 수문학 분야에서 사용되는 증발량 추정공

식은 대부분 유역에서의 경우를 다루고 있어 빗물이용과 관련한 해석에 직접적용은 어렵다.

2.1.2. 모형의 구성

전 절에서 언급한 사항들이 적절히 반영된 유출모형은 존재하지 않는다. 따라서 빗물이용과 관련한 특수 상황을 반영할 수 있는 유출모형의 구성을 위해 기존에 발표된 여러 모형들의 구조를 비교·평가하였으며, 본 연구에서는 IHACRES 모형(Integrated Hydrological Analysis - Center for Resources and Environmental Studies, The Australian National University; Jakeman and Hornberger, 1993; Jakeman et al., 1990)을 선정하였다. 특히, 위 모형은 추정해야 하는 모형의 매개변수가 적어 빗물이용과 관련된 수문해석에 장점을 가지는 것으로 판단하였다.

모형의 구조를 간단히 살펴보면 다음과 같다. 먼저 모형은 크게 두 부분(모듈)으로 나누어지며, 하나는 시간 k 에서의 관측 우량(r_k)을 유효우량(또는 초과우량, u_k)로 변환시키는 비선형 강우손실 모듈이고, 또 하나는 유효우량을 하천유량(q_k)로 변환시키는 선형모듈이다(Fig. 1). 이러한 두 개의 모듈에 최대 8개까지의 매개변수가 개입된다(Table 1). 모형의 각 부분을 구성하는 지배방정식은 식 (1)~(3)으로 표현된다(Hansen et al., 1996).

$$u(k) = \begin{cases} r(k)(s(k))^p, & \text{if } r(k) > l \\ 0, & \text{if } r(k) \leq l \end{cases} \quad (1)$$

$$s_k = c r(k) + (1 - (1/\tau_w(t(k))))s(k-1) \quad (2)$$

$$\tau_w(t(k)) = \tau_w \exp(20f - t(k)f) \quad (3)$$

본 연구에서는 IHACRES 모형을 대상인 빗물이용의 수문해석을 위해 간단하게 수정하였다. 우선, 손실과정의 비선형성은 그대로 유지하였다. 이는 특히 강우의 정도에 따라 초기우수의 규모 및 증발량의 차이를 모의하는데 적절한 것으로 판단하였다. 증발량의 경우도 온도만의 함수로 표현되므로 짧은 관측기록만으로도 매개변수의 추정이 가능하다. 손실량을 제외한 부분(유효우량)은 전부 탱크로 유입되는 것으로 하였으며, 물론 탱크의 용량을 초과한 유입량은 자연 배출된다. 마지막으로 강우로 인한 유출량은 모두 당일 발생하는 것으로 가정하였다. 또한 본 연구에서는 무강우량으로 간주하는 강우량의 한계 l 을 0으로 가정하였다. 이러한 결과로 빗물이용의 수문해석을 위한 모형에는 c, τ_w, f, p 등 네 개의 매개 변수만이 포함되게 된다. 모형 매개변수에 대한 물리적인 의미와 민감도에 관해서는 Sefton and Howarth (1998), Andréassian 등(2001), Dye and Croke(2003), Croke and Jakeman(2004a), 박용희(2006)의 연구에서 논의된 바 있다.

2.2. 빗물이용의 수문학적 해석

2.2.1. 대상시설의 개요

현재 국내에서 운영 중인 빗물이용시설 중에 수문학적인

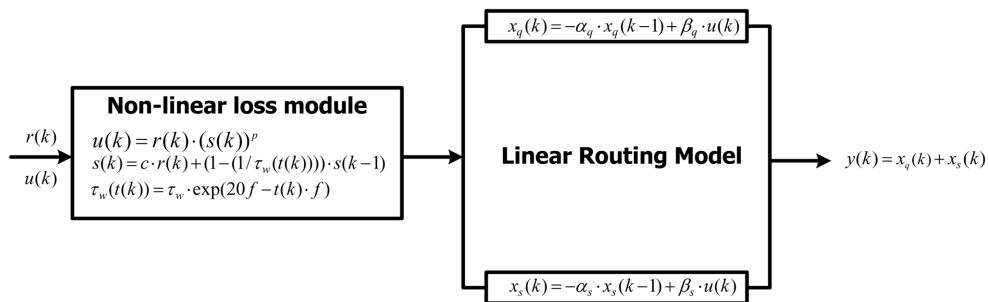


Fig. 1. Schematic representation of the IHACRES rainfall-runoff model.

Table 1. Variables and parameters of the IHACRES rainfall-runoff model (Croke et al., 2004b)

Model inputs and outputs		Model parameters	
$r(k)$	Rainfall	c	Volumetric storage coefficient of basin
		τ_w	Drying rate of catchment
$t(k)$	Temperature	f	Temperature modulation of dry rate
		p	Exponential loss parameter
$s(k)$	Soil moisture index	l	A nonezero threshold value for rain to give streamflow
		α_q, α_s	Quick and slow flow recession rates
$u(k)$	Effective rainfall	β_q, β_s	Fractions of $u(k)$ for peak response
		$\nu_q = \frac{\beta_q}{1 + \alpha_q}$	Relative volume of quick flow response
$y(k)$	Streamflow	$\nu_s = \frac{\beta_s}{1 + \alpha_s}$	Relative volume of slow flow response

Table 2. Summary of rainwater utilization facilities considered

Facilities	Seoul National University (SNU)	Korea Institute of Construction Technology (KICT)	Daejeon World Cup Stadium (Daejeon WCS)
Collecting location	Roof	Roof	Bottom of auxiliary stadium
Collecting area (m ²)	2,098	427	8,362
Storage tank capacity (ton)	200	49	200
Usage	Toilet flushing, garden irrigation	Toilet flushing, garden irrigation, washing	Lawn irrigation
Daily water consumption (ton/day)	187	7.9	150
Daily rainwater consumption (ton/day)	6 or 21	0.5	5.5

해석이 가능할 만큼 적절한 자료가 관측되고 있는 곳은 거의 없다고 할 수 있다. 그러나 그 중에서 상대적으로 자료가 잘 구비되어 있는 곳이 본 연구의 대상 시설인 서울대학교 및 건설기술연구원 빗물이용시설이다(Table 2). 본 연구에서의 해석은 이 두 시설에 대해 집중적으로 수행하였으며 여기에 대전 월드컵경기장을 추가하였다. 대전 월드컵경기장의 빗물이용시설은 관측된 수문자료는 없으나 서울대 및 건설기술연구원 시설의 사례를 바탕으로 매개변수를 추정하여 장기유출 모의를 실시하였다.

2.2.2. 관측자료

본 연구에서 제안한 모형의 매개변수 추정을 위하여 서울대학교 시설과 건설기술연구원 시설에서 측정된 자료를 수집하였다. 각 대상시설에서 측정된 자료의 자료기간은 Table 3과 같다.

모형을 구동하기 위해서는 모형의 입력자료인 강우자료와 온도자료가 필요하다. Table 3에 나타난 바와 같이 서울대시설의 강우자료와 온도자료, 그리고 건설기술연구원의 온도자료는 측정되지 않았다. 따라서 매개변수를 추정할 경우 두 시설의 누락된 자료에 대하여 서울(기상청)관측소의 일강우, 일평균기온자료를 이용하였다.

매개변수의 추정을 위해서는 모형의 응답인 유입량 자료가 중요하다. 건설기술연구원 시설의 경우에는 측정된 유입량 자료가 존재하지만, 서울대 시설의 경우에는 유입량 자료가 측정되고 있지 않기 때문에 저류량 자료와 사용량 자료를 이용하여 유입량 자료를 구성하였다. 이때 유입량이 저류조의 용량인 200톤에 근접하게 나타난 자료는 저류조에서의 월류량이 측정되지 않아 이 부분을 고려하지 못하기

때문에 과소 추정된 값일 가능성이 크다. 따라서 모형의 매개변수 추정에는 고려될 수 없다. 아울러 초기우수 배제에 대한 구체적인 방법 또는 기준이 마련되어 있지 않아 이를 포함한 모든 손실을 총 손실로 처리하였다. 실측자료와 매개변수 추정을 위하여 구성된 자료는 Figs. 2 and 3과 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 모형의 매개변수 추정

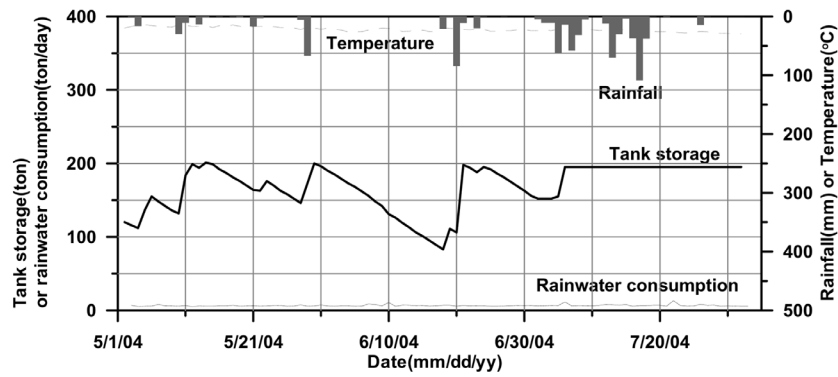
IHACRES 모형 매개변수에 대한 적정 범위는 박용희(2006)의 연구에 의해 고찰된 바 있다. 그러나 빗물이용시설을 반영하는 최적 매개변수는 자연유역의 경우와 다를 것으로 예상된다. 따라서 물리적으로 가능한 매개변수의 모든 범위를 대상으로 평균 자승 오차가 최소가 되도록 시행착오법을 수행하였다.

관측된 전체자료를 이용하여 최적화된 매개변수 적용하는 경우 유입량이 상한계유입량(유출계수(C)를 1로 가정하였을 경우)보다 높게 나타나는 경우가 나타났다. 이러한 문제점의 원인은 Fig. 3에서도 확인할 수 있는데, 기본적으로 강우량보다 큰 유입량이 존재하기 때문이다. 서울대와 건설기술연구원 시설의 관측자료에서 모두 이러한 문제점이 확인되었다. 이러한 문제점의 원인을 명확히 밝히기는 어려우나 빗물이용시설 인근에서 강우(서울대) 및 기온 관측(서울대 및 건기연)이 직접 이루어지지 않아 서울 지점 자료의 대표성이 떨어질 수 있다는 문제점이 있을 수 있다. 또한 건기연 시설과는 다르게 서울대 시설의 경우 계곡수 또는 중수도 등 기타 급수시설로부터 저류조로 유입이 발생하기 때문에 이와 같은 상황이 발생할 가능성이 있다. 따라서

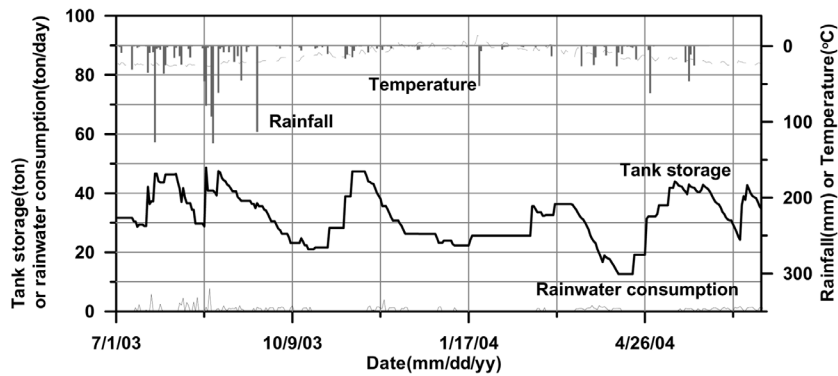
Table 3. Data available for rainwater utilization facilities considered

Facilities Data	Observation period (yyyy/mm/dd~yyyy/mm/dd)		
	SNU	KICT	Daejeon
Rainfall	-	2003/07/01 ~ 2004/06/31	-
Temperature	-	-	-
Inflow	-	2003/07/01 ~ 2004/06/31	-
Storage	2004/04/30 ~ 2004/07/31	2003/07/01 ~ 2004/06/31	-
Rainwater consumption	2004/03/01 ~ 2004/07/31	2003/07/01 ~ 2004/06/31	-

※ - : ungauged

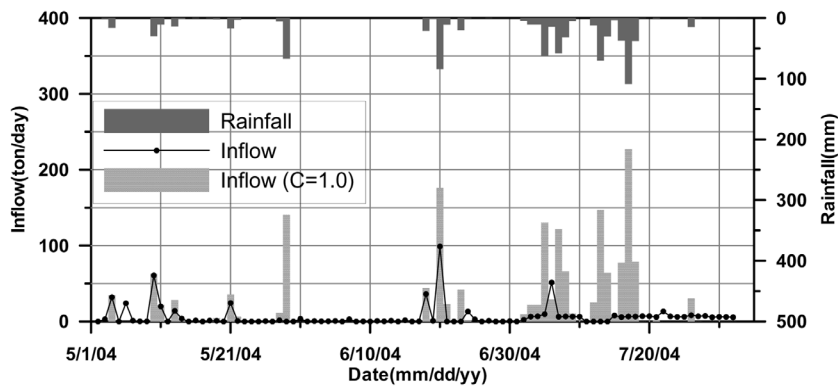


(a) SNU

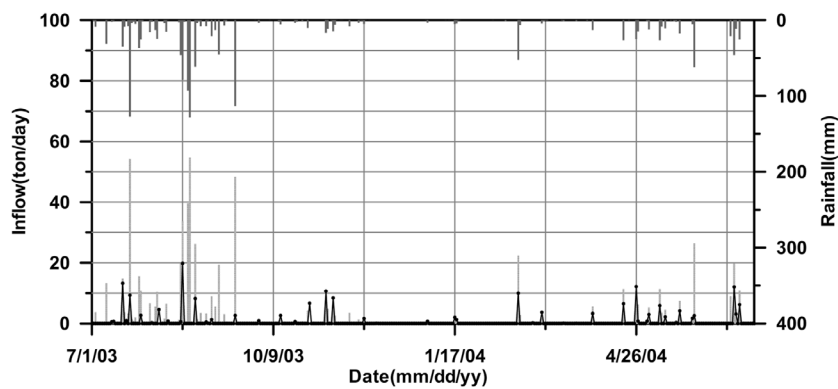


(b) KICT

Fig. 2. Gauged data of two rainwater utilization systems.



(a) SNU



(b) KICT

Fig. 3. Inflow data of two rainwater utilization systems.

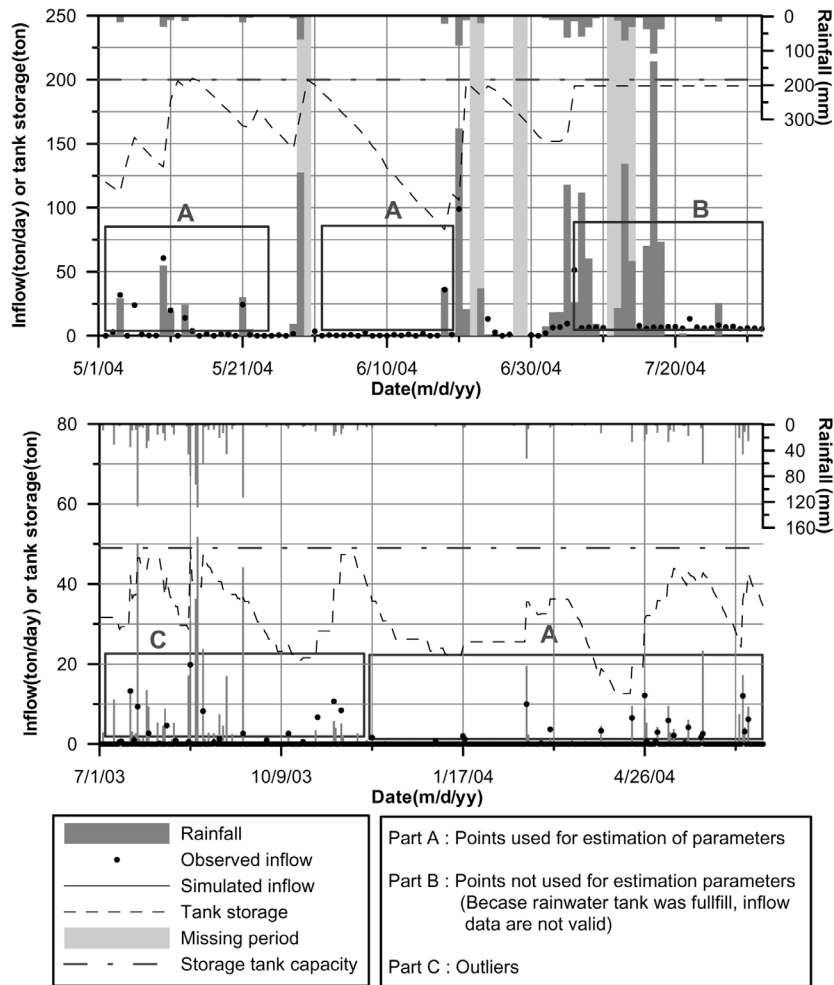


Fig. 4. Comparison of observed data and simulated data.

Table 4. Model parameters estimated in this study

Facilities	Parameters				Statistics		
	c	τ_w	f	p	R^2	RMSE (ton)	BIAS (ton)
SNU	0.2×10^{-2}	2.4	1.0×10^{-7}	0.05	0.88	4.52	0.79
KICT	0.2×10^{-2}	2.4	1.0×10^{-7}	0.06	0.71	0.67	-0.13

본 연구에서는 신뢰성 있는 측정치라고 판단되는 부분의 측정치에 대하여 매개변수를 추정하였다. 그 결과를 정리하면 Table 4 and Fig. 4와 같다.

여기서 주목할 만한 사항은 서울대 시설과 건설기술연구원 시설에 대하여 추정된 매개변수가 거의 유사하다는 것이다. 이러한 결과의 가장 큰 이유는 집수면이 동일 종류로 유사한 유출특성을 보이기 때문으로 판단된다. 물론, 최적화에 이용된 자료가 충분하지 않고 자료기간도 제한적이기 때문에 다른 상황에서의 적용성을 판단하는 것은 무리이지만, 추정된 매개변수에 대한 신뢰도를 보여주는 결과로 받아들일 수 있다. 대전 월드컵경기장의 경우에는 관측 자료가 없기 때문에 서울대시설의 매개변수로 구성된 식 (1)에 유출계수를 추가하여 일급수량 150 톤(Table 2)을 이용할 경우 연빗물이용량인 2,000 톤에 가장 근접한 유출계수(0.2)를 추정하여 이용하였다.

3.2. 장기유출 모의

추정된 매개변수를 이용하여 서울대, 건설기술연구원 시설에 대해서는 서울관측소(기상청)의 강우자료와 평균기온 자료를 그리고 대전 월드컵경기장 시설에 대해서는 대전관측소(기상청)의 강우, 평균기온자료를 이용하여 10년간 (1992~2001) 일자료에 대한 강우-유출 및 저류조의 유입량을 모의하였다(Fig. 5).

빗물이용시설의 경우 손실은 초기우수배재와 집수면의 증발로 발생하게 된다. Table 5 and Fig. 6은 위와 같은 경우로만 손실이 발생한다고 가정을 한 손실량의 규모와 그 월별 비율을 보여준다. 계산된 손실량의 양과 강우총량간의 관계를 통하여 대략적인 유출율을 파악할 수 있는데, 전체 모의기간에 걸친 평균 유출계수는 건물지붕을 집수면으로 하는 경우에는 0.9정도로 운동장의 바닥을 집수면으로 하는 경우는 0.18정도로 계산되었다. 이러한 결과는 기존 빗

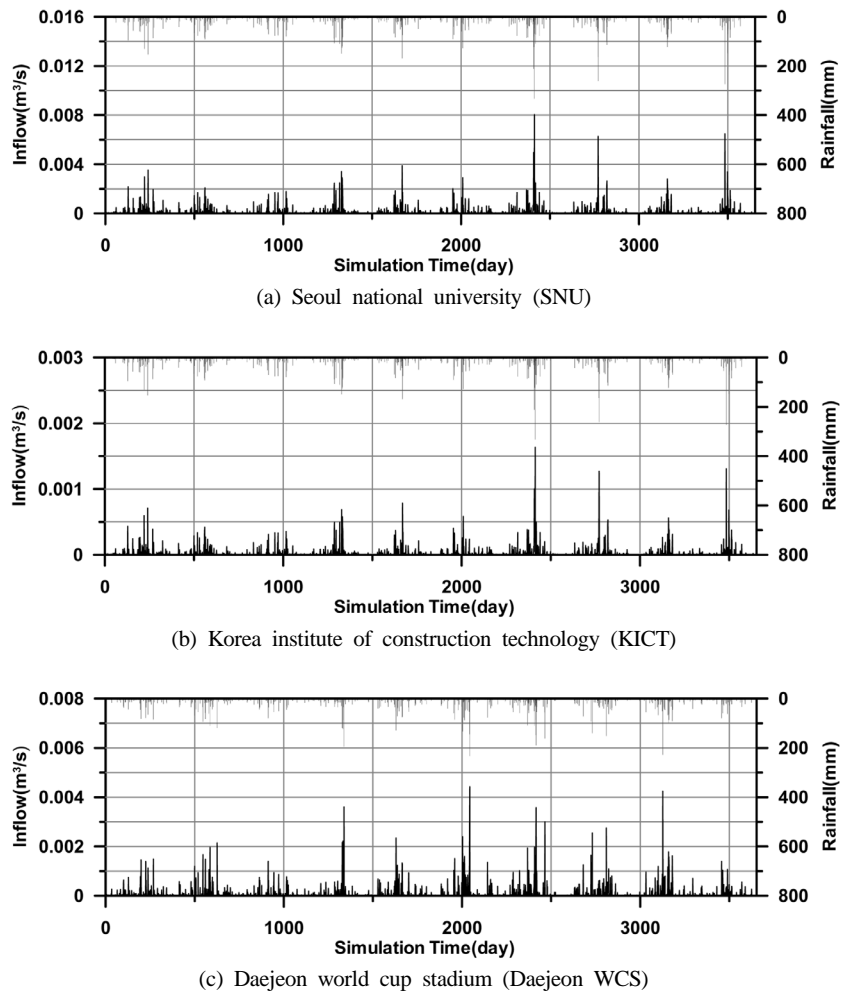


Fig. 5. Simulation results for three rainwater utilization systems.

물 이용시설의 저류조 설계 시 유입되는 빗물의 양을 계산하는데 사용하는 유출계수와 매우 유사한 값으로 모의 결과의 신뢰도를 보여준다고 판단할 수 있다. 물론 이러한

판단의 근거가 다소 부족한 것은 사실이며, 향후 많은 관측 자료가 가용해 지는 경우에는 보다 엄밀한 기준에 의해 모의결과의 신뢰도를 평가해 볼 수 있을 것이다.

Table 5. Monthly mean losses of three rainwater utilization systems

Facility	SNU			KICT			Daejeon WCS		
	Rainfall volume (ton)	Loss (ton)	% Loss	Rainfall volume (ton)	Loss (ton)	% Loss	Rainfall volume (ton)	Loss (ton)	% Loss
Jan	356.2	69.6	19.5	72.5	16.6	22.9	1957.5	1636.4	83.6
Feb	544.9	90.2	16.5	110.9	21.6	19.5	2690.1	2238.2	83.2
Mar	749.4	120.2	16.0	152.5	28.9	18.9	4053.9	3373.1	83.2
Apr	1321.3	196.7	14.9	268.9	47.3	17.6	6094.2	5045.7	82.8
May	2407.9	290.2	12.1	490.1	69.9	14.3	8604.5	7099.7	82.5
Jun	2937.2	351.7	12.0	597.8	84.7	14.2	17420.6	14282.9	82.0
Jul	7212.5	642.9	8.9	1467.9	155.3	10.6	20380.7	16733.6	82.1
Aug	9564.2	650.3	6.8	1946.6	157.2	8.1	29170.8	23803.3	81.6
Sep	2524.7	276.3	10.9	513.9	66.6	13.0	11217.6	9198.0	82.0
Oct	1329.9	186.9	14.1	270.7	44.9	16.6	5955.4	4926.7	82.7
Nov	1010.8	165.8	16.4	205.7	39.8	19.3	4415.1	3665.7	83.0
Dec	467.2	85.2	18.2	95.1	20.4	21.4	1945.8	1625.5	83.5
Rainy season	22238.6	1921.2	8.6	4526.2	463.8	10.2	78189.7	64017.8	81.9
Annual	30426.2	3125.9	10.3	6192.6	753.1	12.2	113906.3	93628.8	82.2

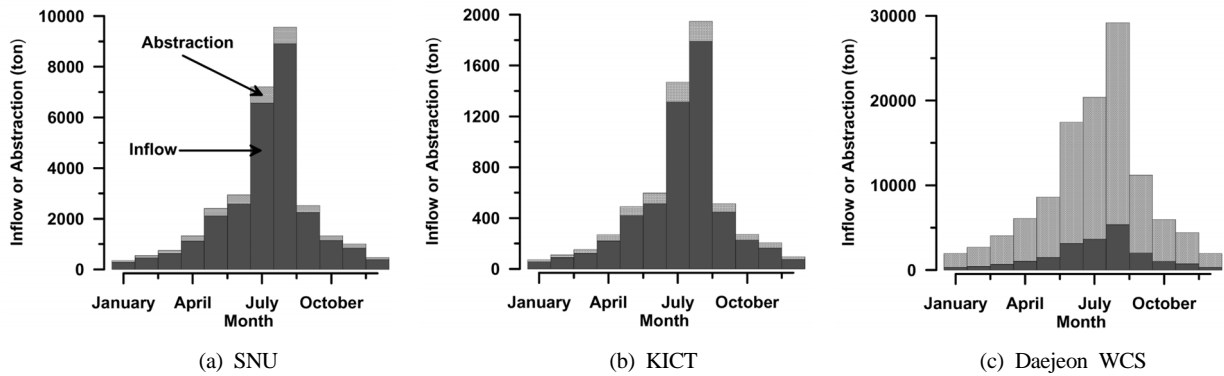


Fig. 6. Comparison of monthly mean inflows and losses.

4. 결론

본 연구에서는 빗물이용과 관련한 장기유출해석의 특성을 파악하고 이를 모형화하는데 IHACRES 모형을 이용하였다. IHACRES 모형은 매개변수의 수가 적어 현재 가용한 자료가 충분하지 않은 상황에서 빗물이용과 관련된 유출 모의를 수행함에 있어서 장점을 가지는 모형으로 판단되었다. 이 모형을 이용하여 우리나라의 대표적인 빗물이용 시설인 서울대학교, 건설기술연구원 및 대전 월드컵 경기장 빗물이용시설에 대하여 10년간(1992~2001년) 장기유출모의를 수행하였다.

그 결과 건물지붕을 집수면으로 하는 경우의 유출계수는 0.9정도, 운동장의 바닥을 집수면으로 하는 경우의 유출계수는 0.18정도로 파악되었다. 이러한 결과는 기존 빗물저류조 설계 시 적용하는 유출계수와 매우 유사한 값으로 사용된 모형 및 모의결과의 정도를 확인시켜주는 결과로 이해할 수 있었다.

이와 같이 빗물이용시설의 수문학적 특성을 고려하여 모의된 장기유출자료는 향후 빗물이용시설을 통한 빗물이용량 및 이용일수의 정량화에 이용될 수 있으며, 빗물이용시설을 통해 얻을 수 있는 경제성 및 부가적인 효과를 평가하는데도 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 더욱이 본 연구에서 모의한 자료는 일단위 자료이기 때문에 강우의 변동특성에 대해 보다 정교한 평가를 수행할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 관측자료의 부족으로 보다 정확한 모형의 평가가 이루어지지 못한 점은 향후 해결해야할 문제로 남는다.

참고문헌

건설교통부(1990). 수자원장기종합계획. 연구보고서.
 건설교통부(2000). 수자원장기종합계획. 연구보고서.
 과학기술부(2004). 21세기 프론티어연구개발사업-수자원의 지속적 확보기술개발사업-우수 저류 및 활용기술 개발. 연구보고서.
 농림부(2003). 농어촌지역 우수의 생활용수 이용시스템 개발. 연구보고서.
 대한상공회의소(2004). 빗물이용시설 활성화 방안의 문제점

및 개선방안. 연구보고서.
 대한상하수도학회(2003). 빗물이용시설 보급 확대를 위한 정책방안 연구. 연구보고서.
 대한상하수도학회(2005). 빗물이용시범시설 운영·관리 모니터링 연구. 연구보고서.
 박용희(2006). IHACRES 모형을 이용한 관측유량의 평가 및 보완. 석사학위논문, 고려대학교.
 서울시정개발연구원(2003). 빗물이용을 통한 도시 침수저감 및 수돗물 절약방안. 연구보고서, 시정연 2003-R-13.
 한무영, 김영완(2004). 서울대학교 기숙사 빗물이용시설의 개요와 경제성 평가. 상하수도학회지, 18, pp. 547-557.
 Al-Jayyousi, O. R. (2003). Greywater reuse: towards sustainable water management. *Desalination*, 164, pp. 241-247.
 Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., Usart-Sanchez, I. and Lavabre, J. (2001). Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, 250, pp. 206-223.
 Appan, A. (1999). A dual-mode system for harnessing roofwater for non-potable uses. *Urban Water*, 1, pp. 317-321.
 Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiyah, R. S. and Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modelling and assessment, Part 1. Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34, pp. 73-89.
 Chilton, J. C., Maidment, G. G., Marriott, D., Francis, A. and Tobias, G. (1999). Case study of a rainwater recovery system in a commercial building with a large roof. *Urban Water*, 1, pp. 345-354.
 Christova-Boal, D., Eden, R. E. and McFarlane, S. (1996). An investigation into greywater reuse for urban residential properties. *Desalination*, 106, pp. 391-397.
 Croke, B. F. W. and Jakeman, A. J. (2004a). A catchment moisture deficit module for the IHACRES rainfallrunoff model. *Environmental Modelling and Software*, 19, pp. 1-5.
 Croke, B. F. W., Merritt, W. S. and Jakeman, A. J. (2004b). A dynamic model for predicting hydrologic response to land cover changes in gauged and ungauged catchments. *Journal of Hydrology*, 291, pp. 115-131.
 Dye, P. J. and Croke, B. F. W. (2003). Evaluation of streamflow predictions by the IHACRES rainfallrunoff model in two South African catchments. *Environmental Modelling and Software*, 18, pp. 705-712.
 Fewkes, A. (1999a). Modelling the performance of rainwater collection systems : towards a generalised approach. *Urban*

- Water*, **1**, pp. 323-333.
- Fewkes, A. (1999b). The Use of rainwater for WC flushing: the field testing of a collection system. *Building Environment*, **34**, pp. 765-772.
- Ghisi, E. (2006). Potential for potable water saving by using rainwater in the residential sector of Brazil. *Building and Environment*, **41**, pp. 1544-1550.
- Ghisi, E., Bressan, D. L. and Martini, M. (2007). Rainwater tank capacity and potential for potable water saving by using rainwater in the residential sector of southeastern Brazil. *Building and Environment*, **42**, pp. 1654-1666.
- Ghisi, E., Montibeller, A., and Schmidt, R. W. (2006). Potential for potable water saving by using rainwater : An analysis over 62 cities in southern Brazil. *Building and Environment*, **41**, pp. 204-210.
- Handia, L., Tembo, J. M. and Mwiindwa, C. (2003). Potential of rainwater harvesting in urban Zambia. *Physics and Chemistry of the Earth*, **28**, pp. 893-896.
- Hansen, D. P., Ye, W., Jakeman, A. J., Cooke, R. and Sharma, P. (1996). Analysis of the effect of rainfall and streamflow data quality and catchment dynamics on streamflow prediction using the rainfall-runoff model IHACRES. *Environmental Software*, **11**, pp. 193-202.
- Jakeman, A. J. and Hornberger, G. M. (1993). How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model?. *Water Resources Research*, **29**, pp. 2637-2649.
- Jakeman, A. J., Littlewood, I. G. and Whitehead, P. G. (1990). Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable Component flows with application to two small upland catchments. *Journal of Hydrology*, **117**, pp. 275-300.
- Leavesley, G. H., Lichty, R. W., Troutman, B. M. and Saindon, L. G. (1983). *Precipitation-runoff modeling system; user's manual*. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations, 83-4238, pp. 207.
- Lee, K. T., Lee, C. D., Yang, M. S. and Yu, C. C. (2000). Probabilistic design of storage capacity for rainwater cistern system. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **77**, pp. 343-348.
- Nolde, E. (1999). Greywater reuse for toilet flushing in multi-storey buildings over ten years experience in Berlin. *Urban Water*, **1**, pp. 275-284.
- Sefton, C. E. M. and Howarth, S. M. (1998). Relationships between dynamic response characteristics and physical descriptors of catchments in England and Wales. *Journal of Hydrology*, **211**, pp. 1-16.
- Sugawara, M. I., Watanabe, I., Ozaki, E. and Katsuyame, Y. (1983). *Reference manual for the TANK model*. Report, National Research Center for disaster prevent, Tokyo, Japan.
- Tabios III, G., Obeysekera, J. T. and Salas, J. D. (1991). *Forecasting and control of water resources system(NWS-PC Model)*. U.S., National Weather Service Center.
- Thomas, T. (1998). Domestic water supply using rainwater harvesting. *Building Research and Information*, **26**, pp. 94-101.
- Villarreal, E. L. and Dixon, A. (2005). Analysis of a rainfall collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrlöping, Sweden. *Building and Environmental*, **40**, pp. 1174-1184.
- Wung, T. C., Lin, S. H. and Huang, S. M. (2006). Rainwater reuse supply and demand response in urban elementary school of different districts in Taipei. *Resources, Conservation and Recycling*, **46**, pp. 149-167.