

# 빗물이용시설의 수문학적 평가

## Hydrological evaluation on rainwater utilization systems

유철상<sup>1)</sup>, 김경준<sup>2)</sup>, 윤주환<sup>3)</sup>

Chulsang Yoo, Kyoungjun Kim and Zuwhan Yun

### 요 지

본 연구에서는 빗물이용시설에 대한 수문학적 평가를 장기유출모형을 이용하여 수행하였다. 빗물이용시설의 특성에 잘 부합되고, 자료가 충분하지 않은 상황에 적절한 모형을 선택하여 10년간 장기유출모의시켰다. 유출모의된 자료를 이용하여 사용량, 저류량, 월류량, 손실량등을 계산할 수 있었으며, 그들에 대한 월별 특성 또한 파악할 수 있었다.

**핵심용어** : 빗물재이용시설, 장기유출

### 1. 서론

빗물이용시설로 인하여 이용가능한 빗물이용량을 결정함에 있어서 가장 많이 사용되는 방법은 집수면의 특성에 따른 유출계수를 정하고 연평균 강수량과 집수면적을 곱하여 추정하는 방법이 일반적인 방법이다. 그러나 본 연구에서는 빗물이용시설의 특성을 잘 반영할 것이라고 판단되는 IHACRES(Integrated Hydrological Ananysis - Center for Resources and Environmental Studies, The Austrailian National University; Jakeman et al., 1990; Jakeman and Hornberger, 1993) 모형을 이용하여 빗물재이용시설을 통하여 이용가능한 양과 빗물저류조 크기의 적정성등을 평가하고자 한다.

대상 시설은 이미 설치, 운영되고 있는 서울대학교 빗물이용시설과 건설기술연구원의 빗물이용 시설, 대전월드컵경기장시설로 선정하였으며, 이들 시설에서 측정된 자료를 이용하여 본 연구에서 새롭게 구성된 IHACRES 모형의 매개변수를 추정하고, 인근 기상관측소 자료를 이용하여 장기유출모의를 실시하여 각 시설의 빗물저류조의 수위 변화와 이용가능한 빗물이용량을 모의하였다.

### 2. 모형의 구성

빗물이용시설과 관련 강우-유출해석은 일반구역의 해석과는 다른 특성들을 갖는다. 빗물이용시설의 집수면을 하나의 구역이라 가정하면, 구역은 매우 작은 규모이므로 당일 강우가 당일 유출로 발생한다는 가정을 할 수가 있다. 또한 손실의 대부분이 증발의 형태로 발생하며 건물옥상과 같은 집수면을 갖는 경우에는 온도가 높아짐에 따라 더 큰 증발량을 갖게 될 것이다. 그리고 침투는 발생하지 않으며 따라서 중간유출이나 지하수 유출도 발생하지 않는다.

1) 정회원·고려대학교 사회환경시스템공학과 부교수 ·E-mail : envchul@korea.ac.kr  
2) ·고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 ·E-mail : guitar77@korea.ac.kr  
3) ·고려대학교 환경시스템공학과 교수 ·E-mail : envzyun@korea.ac.kr

그러나 위에서 언급한 사항들이 적절히 반영된 유출모형은 존재하지 않는다. 또한 모형이 존재한다도 할 지라도 가용 자료가 충분하게 구비되어 있지 않기 때문에 문제점을 갖게 된다. 따라서 빗물이용과 관련한 특수 상황을 반영할 수 있는 유출모형의 구성을 위해 기존에 발표된 여러 모형들의 구조를 비교·평가하였으며, 본 연구에서는 IHACRES 모형(Integrated Hydrological Ananalysis - Center for Resources and Environmental Studies, The Australian National University; Jakeman et al., 1990; Jakeman and Hornberger, 1993)을 이용하기로 하였다. 특히, 위 모형은 추정해야하는 모형의 매개변수가 작아 빗물이용과 관련된 수문해석에 장점을 가지는 것으로 판단하였다.

이 모형의 구조를 간단히 살펴보면 다음과 같다. 먼저 이 모형은 크게 두 부분(모듈)로 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. 이러한 두개의 모듈에 최대 8개까지의 매개변수가 개입된다. 모형의 각 부분을 구성하는 지배방정식은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$u_k = \begin{cases} s_k^p r_k & \text{if } r_k > I \\ 0, & \text{if } r_k \leq I \end{cases} \quad (1)$$

$$s_k = cr_k + [1 - 1/(\tau_w(t_k))]s_{k-1} \quad (2)$$

$$\tau_w(t_k) = \tau_w \exp[(20 - t_k)f] \quad (3)$$

여기서,  $r(k)$ 는 강우,  $t(k)$ 는 온도,  $s(k)$ 는 토양수분지수,  $u(k)$ 는 유효우량,  $y(k)$ 는 유출량,  $c$ 는 유역의 저류상수,  $\tau_w$ 는 유역의 건조율,  $f$ 는 건조율의 온도보정,  $p$ 는 유출관련 상수이다.

본 연구에서는 이러한 IHACRES 모형을 대상인 빗물이용의 수문해석을 위해 수정하여 간단화 하였다. 먼저, 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. 이러한 결과로 빗물이용의 수문해석을 위한 모형에는  $c$ ,  $\tau_w$ ,  $f$ ,  $p$  등 네 개의 매개 변수만이 포함되게 된다.

### 3. 적용 예

#### 3.1 대상시설의 관측자료

본 연구에서 제안한 모형의 매개변수 추정을 위하여 서울대학교 시설과 건설기술연구원 시설에서 측정된 자료를 수집하였다. 각 대상시설에서 측정된 자료는 서울대의 경우, 저류량자료(2004/4/30 ~ 2004/7/3)와 빗물이용자료(2004/3/1 ~ 2004/7/31), 건설기술연구원의 경우는 강우자료(2003/7/1 ~ 2004/6/31), 유입량자료(2003/7/1 ~ 2004/6/31), 저류량자료(2003/7/1 ~ 2004/6/31), 빗물이용자료(2003/7/1 ~ 2004/6/31)이다. 모형을 구동하기 위해서는 필요한 강우자료와 온도자료에서 두 시설의 경우 누락된 자료에 대하여 서울(기상청)관측소의 일강우, 일평균기온자료를 이용하였으며, 매개변수의 추정을 위한 유입량 자료의 경우는 저류량자료와 사용량 자료를 이용하여 유입량자료를 구성하였다. 이때 저류조의 용량(서울대:200톤, 건기연:49톤)에 근접한 자료는 월류량이 측정되지 않기 때문에 매개변수 추정에 고려될 수 없다. 아울러 초기우수 배제에 대한 처리법이 마련되

어 있지 않은 관계로 이를 포함한 모든 손실을 총 손실로 처리하였다. 실측자료와 매개변수 추정을 위하여 구성된 자료는 그림 1에 나타나 있다.

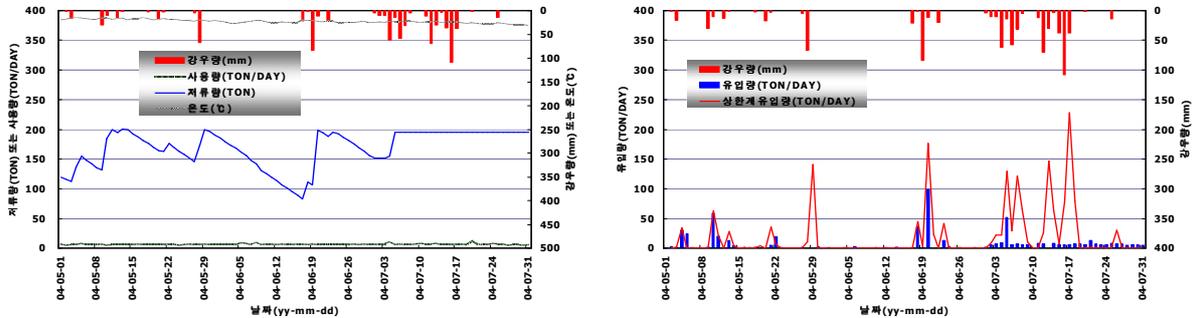


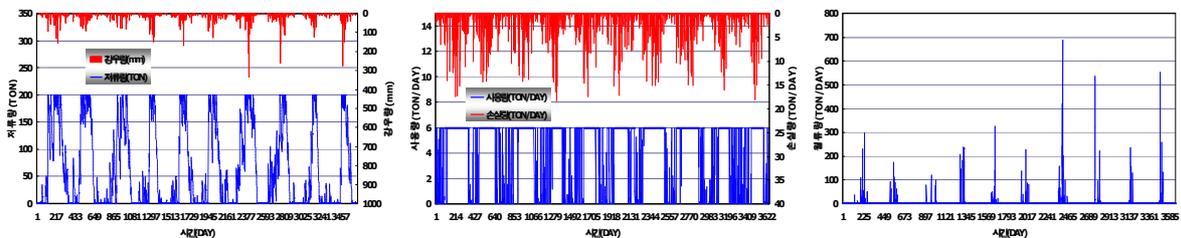
그림 1. 빗물이용시설에서 측정된 자료와 구성된 유입량 자료와 상한계유입량(서울대)

### 3.2 모형 매개변수 추정

모형의 매개변수 추정하기 위하여 최적화 기법을 최적 매개변수를 추정하였으나 전체자료를 이용하여 최적화된 매개변수 적용하면 서울대 자료와 건설기술연구원의 실측자료에서 강우량보다 큰 유입량이 존재하기 때문에 유입량이 상한계유입량(유출계수를 1로 가정하였을 경우)보다 높게 나타나는 경우가 발생함을 알 수 있었다. 따라서 신뢰성있는 측정치라 판단되는 몇몇 측정치에 대하여 최적화여 매개변수를 추정하였다.

### 3.3 장기유출모의

추정된 매개변수를 이용하여 서울대, 건설기술연구원 시설에 대해서는 서울관측소(기상청)의 강우자료와 평균기온자료를 그리고 대전월드컵경기장 시설에 대해서는 대전관측소(기상청)의 강우, 평균기온자료를 이용하여 10년간 일 자료(1992-2001)에 대한 강우-유출 및 탱크의 유입량을 모의하였다. 계산된 손실량의 양과 강우총량간의 관계를 통하여 대략적인 유출율을 파악할 수 있는데, 전체에 걸친 평균 유출계수는 건물지붕을 집수면으로 하는 경우에는 0.9정도로 운동장의 바닥을 집수면으로 하는 경우는 0.18정도로 계산되었다. 이러한 결과는 기존 빗물 재이용시설의 저류조 설계시 유입되는 빗물의 양을 계산하는데 사용하는 유출계수와 매우 유사함을 알 수 있다.



(a) 강우량, 저류량 (b) 사용량, 손실량 (c) 월류량

그림 2. 장기유출 모의된 자료를 이용하여 계산되는 자료예시 (서울대 시설, 저류조 용량: 200 ton, 일사용량: 6 ton)

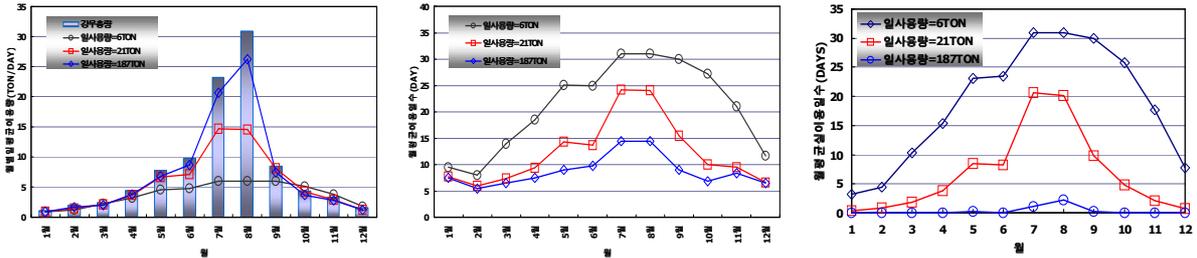


그림 3. 월별 빗물이용량(좌), 가능일수(중간), 월별 빗물 실 이용일수(우) (서울대학교시설)

서울대, 건기연 시설의 경우, 당연히 계획 이용량이 커질수록 실제 이용량이 커진다. 여기서, 과대한 사용량은 사용일수를 크게 떨어뜨리는 문제를 야기시킨다. 계획이용량이 매우 적은 경우 연중 이용이 가능한 장점이 있으나 과도한 시설로서 시설비의 문제가 있고 아울러 저류조내 빗물의 정화문제 및 수질 유지문제가 대두될 수 있다. 대전 월드컵경기장의 경우는 사용량이나 사용일수 측면에서 그 효율성을 찾기 어렵다. 계획사용량은 큰 반면 사용일수는 강우일수와 거의 동일하다. 이는 투수성 집수면적을 갖는 한계로 파악된다.

### 3.4 대상시설의 빗물저장탱크의 용량 평가

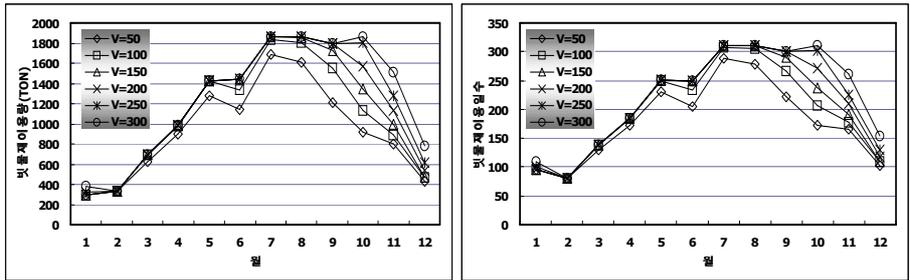


그림 4. 용량 변화에 따른 빗물이용량, 이용일수의 변화(서울대 시설)

본 연구에서는 대상시설의 용량이 적절한 지를 용량의 변화에 따른 이용률의 변화로 평가해 보았다. 그 결과 대체로 탱크의 용량을 증가시키는 경우 10월, 11월 물이용량의 증가를 뚜렷하게 확인할 수 있으나 기타 다른 월에 있어서는 큰 장점이 나타나지 않는 것으로 파악되었다. 이 결과는 우리나라의 기후특성과 밀접한 관계를 갖는데, 다음과 같은 내용을 고려하면 쉽게 이해할 수 있다. 먼저, 우리나라의 우기인 6-9월까지의 강우가 연 강우의 70% 가량을 차지한다. 따라서 10월 이후 익년 5월까지의 빗물 이용 효율은 9월에 강우를 얼마나 저장하느냐와 밀접한 관계가 있다. 따라서 일 사용량의 50배 정도 규모라면 약 50일 정도의 이용일수 증가가 가능하다.

다음으로 월 강우일수를 고려할 수 있다. 우기의 평균강우일수는 대략 10-15일/월 정도이다. 건기의 경우는 5일/월 정도라고 할 수 있다. 따라서 강우시 강우량이 저류조 용량을 채울정도로 충분하다면 우기에는 일 사용량의 5배정도(강우가 규칙적으로 내리지 않으므로) 건기에는 10일 이상이 필요하다. 그러나, 건기의 강우량이 매우 적다는 것을 고려하면 일 사용량 10배 이상의 저류조 용량은 큰 의미가 없다. 따라서 이와 같은 우리나라의 기후특성을 고려하면 충분히 큰 용량을 확보하여 10월 이후를 대비하느냐(이는 도서지역과 같이 가용 용수가 매우 제한적인 경우에 해당), 아니면 5일 정도로 하여 우기시에만 적절히 대처하느냐의 문제로 귀결된다. 용량을 아주 크게

하는 경우에는 수질의 유지문제가 고려되어야 한다. 경제성만을 고려하면 우기만을 대상으로 운영 하는 것이 보다 합리적이다.

### 3.5 홍수유출저감효과의 평가

본 연구에서는 대상 시설에 대하여 사용량을 0으로 가정하고 강우종료후 저류조를 비우는 경우와 그런 조장을 하지 않은 경우로 나누어 모의를 실시하여 월류량을 비교하여 보았다. 월별 월류량의 변화는 그림 5에 나타나 있다. 그 결과 서울대 시설의 경우는 10.5%(우기: 12.8%), 건기연 시설의 경우는 9.6%(우기: 10.5%), 그리고 대전월드컵경기장의 경우는 11.6%(우기:16.4%)정도의 홍수 유출 저감 효과를 나타내었다. 이것은 홍수유출에 크게 영향을 주지 않는다는 결과이며, 예로써, 서울 전체 면적에 10%가 집수면적이라고 가정한다면 (과도한 가정이지만)1%정도의 홍수저감효과를 보여줄 것이라 판단된다. 이와 같은 미미한 결과는 물론 저류조 용량의 한계 때문이다.

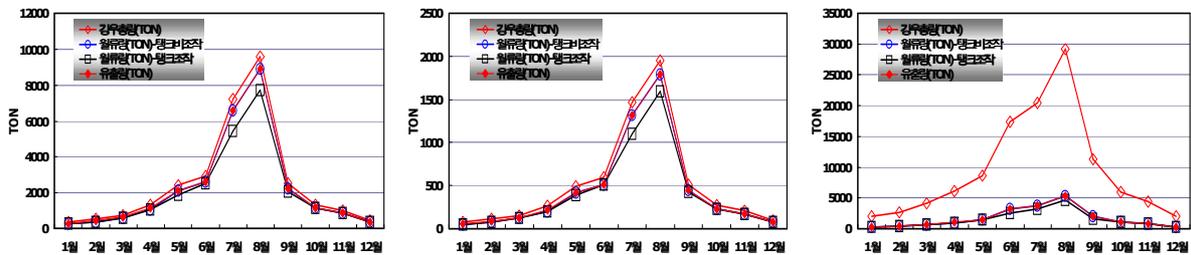


그림 5. 탱크조작여부에 따른 월류량의 변화(좌: 서울대, 중간:건기연, 우:대전월드컵경기장)

## 4. 결론

본 연구는 IHACRES 모형을 이용하여 빗물이용시설의 수문학적 해석을 실시한 후 모의된 자료로 구성된 유입량, 빗물사용량, 손실량, 탱크저류량, 탱크월류량 자료를 이용하여, 빗물이용시설로 인한 빗물가능사용량, 사용일수를 추정하여 경제성을 평가하였다.

서울대학교 시설, 건설기술연구원 시설, 대전월드컵경기장 시설을 대상으로 하여 연구를 수행하였으며, 그 결과 계획 급수량을 증가시키면 사용일수를 떨어뜨리고, 반대로 줄이게 된다면 수질 측면에서 문제가 발생할 것이라 파악할 수 있었다. 또한 빗물이용시설의 설계시 적절한 저류조의 용량 및 집수면적의 결정은 우기를 대상으로 사용하였을 경우를 가정하였을 경우에 경제성면에서 더 적절할 것이라 판단된다. 빗물이용시설로 얻을 수 있는 또하나의 효과인 홍수유출의 저감 효과는 매우 작은 것으로 판단되었다.

## 참 고 문 헌

1. 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*, Vol. 117, pp. 275-300.
2. Jakeman, A.,J. and Hornberger, G., M.(1993). How Much Complexity Is Warranted in a Rainfall-Runoff Model?, *Water Resources Research*, Vol. 29(8), pp. 2637-2649.