

우수이용 시스템의 적용에 관한 연구

○전인배*, 이증석**, 지홍기***, 이순탁***

1. 서론

현재 도서지역에서 우수의 생활용수 이용방법은 강우가 발생하는 시기에 각 가정마다 임의로 항아리나 대형물통 등을 이용하여 우수를 저류시켜 사용하고 있으나 갈수기에는 생활용수 공급에 어려움을 겪고 있어 이에 대한 대체수자원으로서 우수의 생활용수 이용방법, 해수의 담수화 방안 그리고 기존의 상수도 이용방안이 이들 지역의 용수공급의 대안으로 제시되고 있다. 그러나 상수도시설은 도서지역의 지형 및 지질학적 조건상 설치가 불가능하고 해수의 담수화 방법은 에너지가 요구되고 유지관리가 어렵기 때문에 소규모의 도서지역에는 기술적, 경제적으로 설치가 현실적으로 불가능하다.

따라서 본 시스템이 도서지역의 단독주택 또는 마을단위에서 소규모로 생활용수를 공급하는데 효율적인 우수이용 시스템으로서 표준화가 진행되고 일반화된 기준이 정립된다면 갈수기에도 안정적으로 용수를 공급받을 수 있게 되어 도서 및 해안지역의 물부족에 따른 어려움을 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 갈수기에도 안정적으로 운영할 수 있는 탱크크기와 집수면적의 최적 설계기법을 개발하고 우기에 주·부탱크에 강우량을 저류시켜서 생활용수로 이용할 수 있는 안정적인 우수이용 시스템을 표준화하는데 그 목적이 있다.

2. 우수이용 시스템의 구성

2.1 우수집수-저류-용수공급 시스템

우수집수의 방법은 그림 1과 같이 개별 우수집수 방안(Private Rainwater Harvesting Plan)과 공동 우수집수 방안(Public Rainwater Harvesting Plan)이 있다. 공동 우수집수 방안은 기존의 지붕을 이용한 개별 우수집수 방안의 집수량 부족을 극복하기 위하여 취락군별로 공동 집수면을 설치하고 공동탱크(Public Tank)에 저류하여 생활용수로 활용하는 방법이다.

강우가 임의의 t 월에 집수면에서 저류탱크로 유입할 수 있는 유량 Q_t ($m^3/month$)는 집수면적 A (m^2), t 월의 강우량 P_t ($mm/month$) 및 유출계수 C 에 의해서 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

* 영남대학교 대학원 석사과정 수료
** 경일대학교 토목공학과 교수
*** 영남대학교 토목공학과 교수

$$Q_t = \frac{A \times P_t \times C}{1000} \quad (1)$$

여기서, C 는 집수면의 증발 등에 의한 손실을 고려한 유출계수로서 지붕을 이용한 개별 집수면은 0.75이고 공동 집수면은 0.9를 사용하고 있다.

집수면으로부터 저류탱크에 저류된 우수는 가정의 생활용수로 공급하게 되며, 가정에서의 생활용수의 패턴은 가구의 소비특성, 계절적인 요인, 가구당 구성원의 수 등에 따라 변하게 된다. 우수 이용 시스템이 생활용수 패턴의 변동성에도 불구하고 안정적으로 용수를 공급하기 위해서는 강우의 시계열을 분석하여 저류량의 변화와 탱크의 안정성을 검토할 필요가 있다.

그림 1에서 탱크크기 (T)의 안정성은 집수면으로부터 임의의 t 월에 얻어지는 유량 Q_t ($m^3/month$)와 t 월의 최초의 저류량 S_{t-1} (m^3)를 합하여 t 월에 유입된 총유입량을 구하고 t 월 30일 동안의 용수량 D_t ($m^3/month$)의 차를 구함으로써 t 월말에 남은 탱크의 저류량 S_t (m^3)를 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$S_t = \min [\max [(S_{t-1} + Q_t - D_t), 0], T] \quad (2)$$

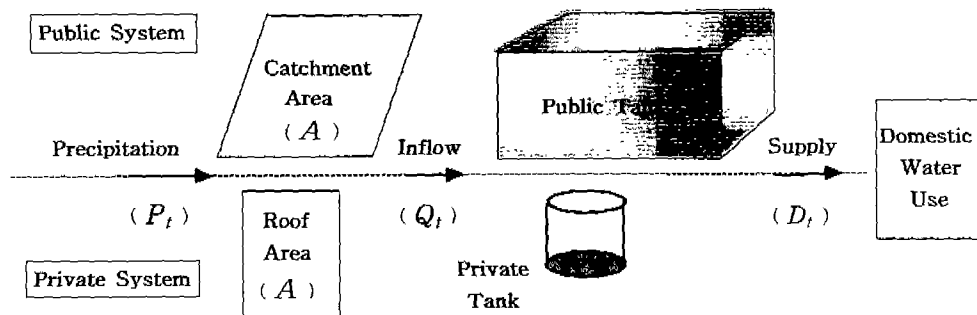


그림 1. 우수집수-저류-용수공급 시스템

2.2 집수면적-탱크크기-용수공급 상관관계

기존의 가옥에 설치하여 운영하는 개별 우수이용 시스템에서 집수면으로 사용하는 지붕만을 가지고는 용수공급에 한계가 있다. 그러므로 그림 2와 같이 공동 우수이용 시스템을 취약단위로 설치하여 개별 시스템의 주탱크(Main Tank)로 용수를 공급하고 주탱크는 개별 및 공동 시스템에서 공급받은 용수를 각 가정에 안정적으로 공급을 한다. 과도한 강우로 주탱크의 유입량이 증가하여 주탱크의 용량을 초과하게 되면 월류가 발생하고 이 월류수는 부탱크에 저류되어서 저류량 부족 시 사용한다.

개별 시스템에서 가정의 용수수요량의 50, 40, 30%를 공급할 수 있다면 부족량은 공동 시스템에서 부담하게 되며, 이 부족량을 충분히 공급할 수 있게 공동 시스템의 집수면적과 공동 저류탱크의 크기를 설계해야 한다.

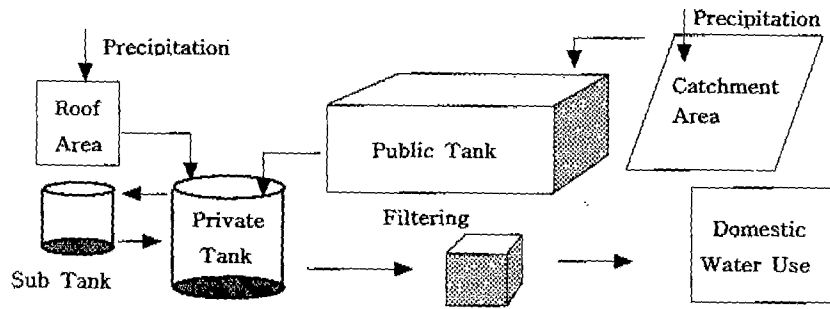


그림 2. 집수면적-탱크크기-용수공급 시스템

3. 집수-저류 시스템의 설계

3.1 적용지역의 선정

적용 지역은 지표수가 없고 생활용수의 대부분을 지하수에 의존하고 있는 제주도를 선정하였으며, 공동 우수이용 시스템을 운영하기 위해 30세대 규모의 취락지역을 선정하여 집수-저류 시스템 분석에 적용하였다.

3.2 강우량 및 생활용수 패턴 분석

제주지역의 강우량 및 생활용수량 패턴을 분석하여 갈수기 패턴과 홍수기 패턴을 결정하고 갈수기에서도 안정적으로 용수를 공급할 수 있는 시스템을 설계할 수 있는 기본자료를 구축하였다.

이 지역의 연평균 강우량은 1,400 mm로 고온 다습한 북태평양기단의 영향으로 여름철에는 강우 집중이 큰 편이며, 그림 3은 1968~1999년(32년간)의 강우량자료로부터 월별 평균강우량을 나타내고 있다. 생활용수의 경우 제주시는 1996년 현재 세대당 연간 182.73 m³의 생활용수를 사용하고 있다. 그림 4는 제주시의 세대당 월별 생활용수의 패턴을 나타내고 있으며, 생활용수의 사용량이 가장 많은 달은 7, 8월이고 가장 적은 달은 1, 2월로서 대략 10%의 변동성을 가진다. 그리고 우리나라는 1996년 현재 생활용수의 1인 사용량은 평균 207 l/day이다.

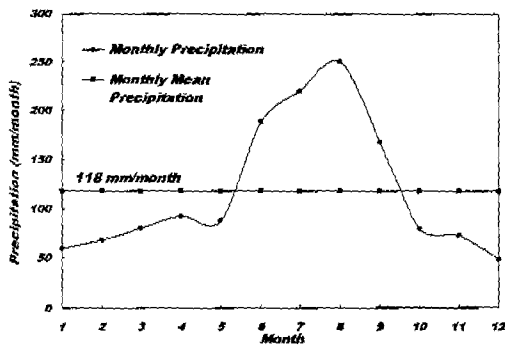


그림 3. 제주지역의 월평균 강우량 패턴

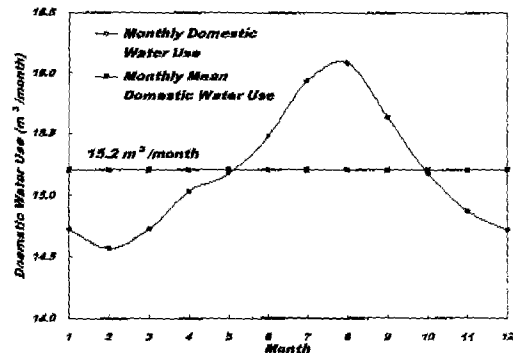


그림 4. 세대당 월별 생활용수량 패턴

3.3 Run's 이론에 의한 우수이용 시스템의 설계

30세대 규모의 취락지에서 지붕면적이 $50 m^2$ 인 가구를 대상으로 Runsum이론에 의해 공동 시스템과 개별 시스템을 병용함으로써 안정적인 우수이용 시스템의 집수면적과 탱크크기를 설계하고자 한다.

1) 개별 우수이용 시스템의 설계

본 연구에서 채택하고 있는 가구에 개별 우수이용 시스템이 운영되면 식(1)을 이용하여 일평균 유입량을 산정할 수 있다. 집수면적이 $A=50 m^2$ 일 때 일평균 강수량 P 는 $4 mm$ 이므로 일평균 유입량은 $0.15 m^3$ 이며, 이 때 가구당 용수량이 $500 l/day(0.5 m^3/day)$ 이므로 개별 시스템에서는 용수량의 30%를 공급할 수 있고 나머지 70%는 공동 시스템을 통하여 공급하도록 설계해야 한다.

표 1은 개별 시스템의 용수공급능력에 따라 40%, 30%를 부담할 경우의 가뭄지표를 각 용수수요별로 산정한 결과로서 L_j^+ (month)는 유입량이 절단수준을 초과하는 기간을 나타내는 것으로, 이 기간은 안정적으로 운영이 가능하지만 반면에 L_j^- (month)는 유입량이 절단수준보다 작은 기간으로 시스템의 운영이 어렵다. 표 1은 L_j^- 가 용수수요 $500 l/day/household$ 일 때 개별 용수공급능력을 40%($200 l/day/household$)로부터 30%($150 l/day/household$)로 내려갈수록 278month에서 236month로 작아지게 된다.

그리고 $\sum S_j^+(m^3)$ 는 L_j^+ 기간동안 누적잉여량이고 $\sum S_j^-$ 는 L_j^- 기간동안의 누적부족량을 의미하며, $I_j^-(m^3/month)$ 는 월평균 부족량으로 누적부족량을 부족기간으로 나눈 값을 의미한다.

Negative Maximum Run-Sum($\max S_j^-$)은 Run-Sum이 최대로 발생하는 개월의 부족량을 의미하므로, 설계된 우수이용 시스템의 저류탱크는 갈수기에도 월최대 부족량의 공급이 가능하다면 시스템 운영이 안정적이라고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 개별 우수이용 시스템의 탱크크기를 $\max S_j^-$ 으로 결정토록 하였다.

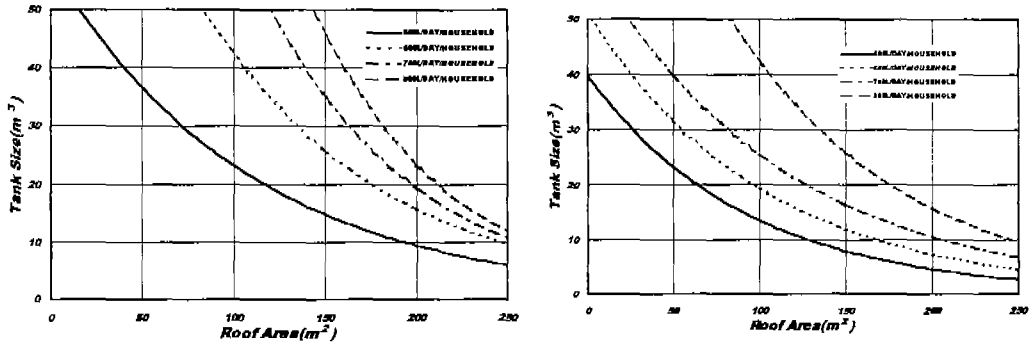
표 1. 개별 용수공급능력 40%, 30%일 때 각 용수수요별 가뭄지표

Truncation Level (l/day/house)	Public System 60% Private System 40%				Public System 70% Private System 30%			
	500	600	700	800	500	600	700	800
Run Index								
L_j^+ (months)	82	57	46	36	123	95	77	57
L_j^- (months)	278	303	314	324	236	264	283	303
$\sum S_j^+ (m^3)$	353	270	208	160	506	407	329	270
$\sum S_j^- (m^3)$	918	1,267	1,638	2,022	531	756	1,003	1,267
$I_j^- (m^3/month)$	3.3	4.2	5.2	6.2	2.3	2.9	3.5	4.2
$\max S_j^- (m^3)$	35.8	83.7	155.3	269.3	23.8	31.0	38.5	83.7

제주지역의 강수량 발생패턴으로부터 용수공급량을 충족시킬 수 있는 집수면적을 산정하고 각 집수면적별 소요 저류탱크의 용량을 계산하였으며, 이 때 각 용수수요별 집수면적-저류탱크의 크기는 그림 5(a)~(b)와 같다.

또한 개별 용수공급시스템에서 공급량을 20%, 10%, 5%를 각각 부담할 때 각 용수수요량에 따른 집수면적-저류탱크 크기의 관계를 이론적으로 산정할 수는 있지만 그 만큼 개별 시스템의 저류탱크의 크기는 작아지게 되고 공동 시스템의 저류탱크의 크기는 과대하게 되는 결과를 가져오게 된다. 그러므로 개별 시스템의 유입량을 가지고 생활용수로 공급이 가능함에도 불구하고 저류탱크의 용량이 작아서 유입량을 충분히 저류시키지 못하고 공동 시스템의 용수공급에 의존하는 현상은

현실적으로 경제적인 운영이 되지 못할 것이다.



(a) 개별 용수공급능력 40%인 경우

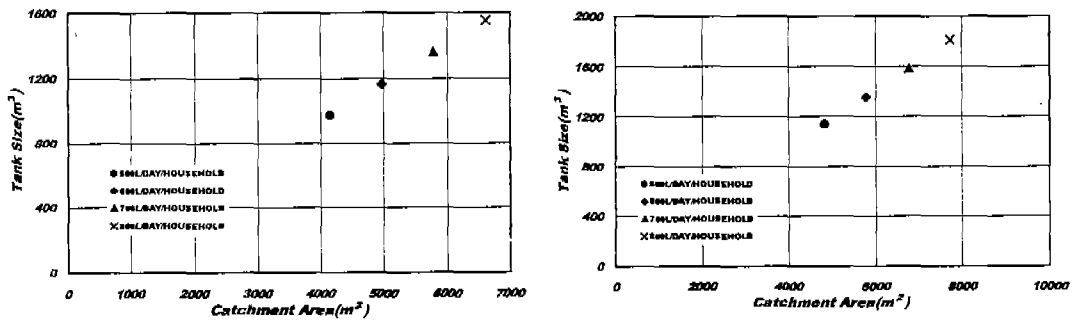
(b) 개별 용수공급능력 30%인 경우

그림 5. 개별 시스템의 집수면적에 따른 탱크크기의 결정

2) 공동 우수이용 시스템의 설계

공동 시스템의 설계에서도 개별 시스템과 동일한 방법의 Runs 분석을 통하여 $\max S_i$ 를 산정하고 집수면적과 탱크크기를 설계한다. 개별 시스템의 경우에는 기존의 집수면을 그대로 사용하므로 집수면적에 따른 탱크의 크기를 결정하였지만 공동 시스템의 경우에는 최적의 집수면적과 탱크크기를 공동 및 개별 우수이용 시스템의 용수공급능력에 따라 결정하여 운영할 수 있다.

그림 6(a)~(b)는 공동 시스템의 집수면적과 탱크크기의 관계로부터 공동 시스템의 용수공급을 각각 60%, 70% 부담할 때의 최적의 집수면적과 탱크크기를 분석하였다. 즉, 공동 시스템이 60%의 용수공급을 부담할 경우에 대체로 집수면적 $5,000 \text{ m}^2$ 에서 저류탱크의 크기는 $1,200 \text{ m}^3$ 이고, 공동 시스템이 70%의 용수공급을 부담할 경우에는 집수면적 $6,000 \text{ m}^2$ 에서 저류탱크의 크기는 $1,400 \text{ m}^3$ 이 필요한 것으로 나타나고 있다.



(a) 공동 용수공급 부담 60%인 경우

(b) 공동 용수공급 부담 70%인 경우

그림 6. 공동 시스템의 집수면적에 따른 탱크크기의 결정

3.4 우수이용 시스템의 적용분석

1986년 1월~2000년 3월까지 5,204개의 일강우량 자료를 사용하여 공동 우수이용 시스템과 개별

우수이용 시스템을 시뮬레이션하였으며, 분석결과를 요약하면 아래와 같다.

우수이용 시스템에서 강우량에 따른 용수공급량의 변화정도를 파악하기 위하여 강우량과 공동 시스템의 용수공급량 그리고 강우량과 개별 시스템의 용수공급량에 대한 상관분석을 실시한 결과 강우량과 공동 시스템의 용수공급량 사이에는 상관계수는 -0.89이고 강우량과 개별 시스템 사이에는 0.42로 나타났으며, 이는 공동 시스템이 개별 시스템의 저류량을 안정시키기 위해서 지속적인 공급이 이루어짐을 나타내고 있다.

그리고 개별 및 공동 시스템의 용수공급량 변화는 각각 0.13, 0.40의 변동계수로서 개별 시스템의 용수공급이 안정적으로 이루어짐을 나타내고 있으며, 월평균 용수공급량은 $14.8 m^3$ 으로 안정적인 용수공급량인 $15 m^3$ 를 98.7% 만족시키는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 제주지역의 32년 동안의 월강우량 자료와 세대별 생활용수 자료를 이용하여 이 지역의 우수집수 시스템의 안정적인 운영을 위한 최적의 저류탱크와 집수면적을 설계하여 안정적인 우수집수 시스템을 운영할 수 있도록 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 시스템의 안정적인 운영을 위해서 세대별 평균용수량을 절단수준으로 취하여 이 지역의 강우량에 대한 가뭄심도를 분석함으로써 개별 우수이용 시스템의 집수면적과 탱크크기를 설계할 수 있었다.
- 2) 기존의 지붕을 집수면으로 이용하는 개별 시스템이 용수수요량의 50, 40, 30%를 각각 부담할 때의 주 탱크의 크기를 결정하고, 공동 시스템이 부담하게 되는 용수수요량의 50, 60, 70%를 각각 공급할 수 있는 공동 시스템의 집수면적과 탱크크기를 설계할 수 있었다.
- 3) 공동 및 개별 우수이용 시스템을 병용함으로써 개별 시스템에서는 부족한 용수를 공급받게 됨으로써 갈수기에는 공동 시스템이 용수공급을 담당하고 장마기에는 개별 시스템에서 필요용수량을 공급할 수 있도록 하였다. 따라서 시뮬레이션 결과 개별 시스템은 강우량의 변화에 크게 영향을 받지 않고 안정적인 필요수량의 98.7%를 공급할 수 있는 것으로 나타나고 있어 본 시스템은 가정에 용수를 안정적으로 공급할 수 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Texas Water Development Board in Cooperation with the Center for Maximum Potential Building Systems, "Texas Guide to Rainwater Harvesting", 1997.
2. South Australia Water Corporation, " Rainwater Tank ", 1996.
3. Yu-Si Fok, Ronald H. L. Fong, Jack Hung, "Bayes-Markov Analysis for Rain-Catchment Cisterns", Water Resources Research Center, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 1980.
4. 전인배, 이종석, 지흥기, 이순탁, "도서지역에서의 우수의 생활용수 이용방안에 관한 연구", 대한토목학회학술발표회, 대한토목학회, 1999. 10.
5. 전인배, 지흥기, 이순탁, "우수와 생활용수 이용을 위한 집수면적과 탱크크기 결정에 관한 연구", 영남대학교 환경문제연구소, 환경연구 제19권 제1호, 1999. 12.
6. 전인배, 지흥기, "생활용수 공급을 위한 우수집수 시스템", 제2회 영·호남 건설관련 연구소 학술 심포지움, 원광대학교 환경건설연구소, 2000. 5.