

# 우수이용 시스템의 설계와 운영

## The Design and Operation of Rainwater Harvesting System

전인배<sup>1)</sup>, 송시훈<sup>2)</sup>, 지홍기<sup>3)</sup>, 이순탁<sup>4)</sup>

### 1. 서 론

지금까지 유역을 개발할 때에 우수처리문제는 유역의 침수방지를 목적으로 내수배제에 주안점을 두고 설계를 해왔으나, 하류부에 침수유량의 증가를 초래해 왔다. 특히, 우리나라는 강우의 발생패턴이 우수기에만 집중되어 있기 때문에 더욱 심각한 문제이며, 도서 및 산간지역의 경우에는 우수기의 풍부한 수자원을 활용하지 못하고 전기에는 용수부족으로 많은 어려움을 겪고 있다. 이러한 현실을 고려할 때 이제는 우수배제계획 수립시 기존의 홍수방어만을 목적으로 수행하던 관행에서 탈피하여 우수저류시스템을 도입함으로써 우수를 유용하게 활용할 수 있는 종합적이고 합리적인 대책을 수립해 나가야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 풍수기 및 평수기에 우수를 저류한 후에 이를 갈수기에 생활용수로 이용할 수 있는 우수이용 시스템을 개발함으로써 상시 용수의 원활한 공급을 가능케하여 도서 및 산간 지역의 용수부족에 대한 어려움을 해결하고 홍수시 내수를 본 시스템에 활용함으로써 홍수를 저감시키는데 그 목적이 있다.

이를 위해서 본 논문에서는 먼저 우수이용 시스템의 수원인 강우의 발생특성을 규명하여 최적의 우수저류 탱크의 크기와 집수면적을 설계하고 우리나라 실정에 맞는 안정적인 우수이용 시스템의 운영기법을 개발하여 활용할 수 있게 하였다.

### 2. 우수이용 시스템

우수이용 시스템은 그림 1과 같이 강우를 집수하는 집수시스템, 집수된 우수를 저장하는 저류시스템 그리고 저류된 우수를 가정으로 보내주는 공동시스템으로 구분된다. 본 시스템이 설치운영되면 호우발생시 개별 시스템에서는 각 가정의 지붕을 통하여 저류탱크에 우수를 저장하고, 공동시스템에서는 인근 하천수를 도수하는 방법이나 도시지역의 경우 유수지를 활용하는 방법 그리고 공동 집수면를 설치하는 방법 등으로 수자원을 집수하고 저류시켜 갈수시 가정의 생활용수로 활용하게 된다.

강우에 의해 집수면으로부터 임의의  $t$ 월에 저류탱크로 유입할 수 있는 유출량  $Q_t$  ( $m^3/month$ )는 집수면적  $A$  ( $m^2$ )와  $t$ 월의 강우량  $P_t$  ( $mm/month$ )의 곱에 유출계수  $C$ 를 곱해서 산정하게 되며, 그 관계는 식(1)을 사용하여 간단히 나타낼 수 있다.

1) (주)경일기술공사 수자원개발부 공학석사  
2) 영남대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료  
3) 영남대학교 토목공학과 교수·공학박사  
4) 영남대학교 토목공학과 교수·공학박사·이학박사

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

여기서,  $C$ 는 집수면의 재질에 따른 증발 등의 손실을 고려한 유출계수로서 지붕은 일반적으로 0.75를 사용한다.

결정된 탱크크기에 대한 안정성을 검토하기 위해서 집수면으로부터 임의의  $t$ 월에 얻어지는 유출량  $Q_t$  ( $m^3/month$ )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  $t$ 월 말에 남은 탱크의 저류량  $S_t$  ( $m^3$ )는 식(2)와 같이 이를 간단히 나타낼 수 있다.

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

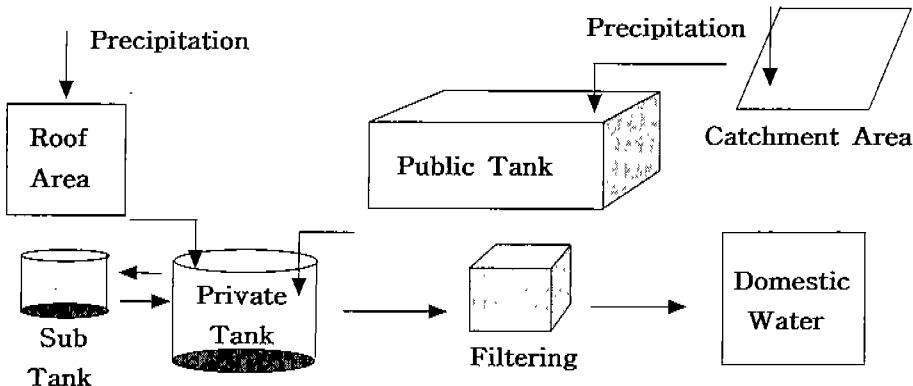


그림 1. 우수집수-저류-공급 시스템

### 3. 강우의 발생특성

우수이용 시스템을 최적으로 설계 및 운영하기 위해서는 본 시스템의 용수공급원인 강우의 발생경향을 규명하는 작업이 선행되어야 한다. 그러므로 본 연구에서는 Run 이론을 이용하여 갈수기의 물부족기간을 분석하였고 강우발생경향은 Bayes-Markov 기법을 이용하여 분석하였으며, 그 결과를 본 시스템을 운영할 때에 의사결정을 위한 지침으로 제시하였다.

#### 3.1 Run 이론

##### 1) Run-Length와 Run-Sum

강우는 임의의 기간동안 일정한 생활용수량(절단수준 ; truncation level) 이하로 내리거나 또는 초과하여 내린다. 이 때 일정한 생활용수량을 초과하는 강우의 지속기간을 Positive Run-Length ( $L_j^+$ )라 하고, 일정한 생활용수량 이하의 강우 지속기간을 Negative Run-Length ( $L_j^-$ )라 한다. 동일한 용수량을 소비한다고 가정하면  $L_j^+$ 에서 초과발생한 강우량을 Positive Run-Sum ( $S_j^+$ )라 하고,  $L_j^-$ 에서 부족한 강우량을 Negative Run-Sum ( $S_j^-$ )이라 한다.

## 2) 가뭄지표

$L_j^-$  와  $S_j^-$  를 이용하여 가뭄을 정의하기 위해서 지속기간(duration), 누적부족량(cumulative deficit) 그리고 월평균부족량(average monthly shortage)과 같은 가뭄지표들이 정의되어야 한다. 이 세 가지 가뭄지표들을 Run이론에서는  $L_j^-$ ,  $S_j^-$  그리고 Negative Run-Intensity ( $I_j^- = S_j^- / L_j^-$ )로 설명하고 있다.

## 3.2 Bayes-Markov 기법

### 1) Bayes 정리

유한 개의 원소로 구성된 사상으로 만들어진 표본 공간에서 사상을 O, Y라 하고 사상 Y가 발생했을 때 사상 O가 발생할 확률을 Y와 관계된 사상 O의 조건부 확률이라 부르며, 이를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(O | Y) = \frac{P(O \cap Y)}{P(Y)} \quad (3)$$

사상 Y가 발생했다는 조건하에 다른 한 사상 O가 발생하게 될 확률을  $P(O | Y)$ 라 하고, 또한 발생하지 않는 경우에 발생한다고 잘못 판단할 조건부확률을  $P(Y | X)$ , 발생하지 않는다고 제대로 판단할 조건부확률을  $P(N | X)$ 로 각각 나타내며, 발생한다고 바르게 판단하게 될 조건부확률  $P(Y | O)$ , 발생하지 않는다고 그릇된 판단을 할 조건부확률  $P(N | O)$ 라고 할 때  $P(O | Y)$ 를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P(O | Y) = \frac{P(O) \cdot P(Y | O)}{P(O) \cdot P(Y | O) + P(X) \cdot P(Y | X)} \quad (4)$$

### 2) Markov 모형

제1차 Markov 모형은 표본자료의 연속적 특성을 이용하여 강우량 자료의 추계학적 발생에 이용되며, 자료의 특성에 따라 운영결과는 바로 직전의 운영결과에 지배만을 받는다. 식 (5)는 제1차 Markov 모형의 형태를 나타내고 있다.

$$Q_{i,j} = \overline{Q}_j + b_j(Q_{i,j-1} - \overline{Q}_{j-1}) + t\sigma_j(1 - \eta^2)^{1/2} \quad (5)$$

여기서,  $Q_{i,j}$ 는 i년, j순(旬)에 발생한 강우량,  $\overline{Q}_j$ 는 한 순 동안에 관측된 강우량,  $Q_{i,j-1}$ 는 i년, j-1순에 발생한 강우량,  $\overline{Q}_{j-1}$ 는 j-1순에 관측된 평균강우량,  $b_j$ 는 j에서 j-1까지 관계에 대한 회귀계수 [ $b_j = r_j(\sigma_j/\sigma_{j-1})$ ], t는 평균이 0이고 단위체적인 normal분포에서 선택된 난수,  $\sigma_j$ 는 j주에서 관측된 강우량의 표준편차,  $r_j$ 는 j에서 j-1까지의 관계에 대한 상관계수이다.

## 4. 우수이용 시스템의 설계 및 운영

본 연구의 대상지역은 도서지역으로서 강우량 관측자료가 비교적 풍부하고 물 문제가 심각한

제주도로 선정하였으며, 특히 지붕면적이  $100m^2$ 인 30세대 규모의 취락을 선정하여 본 연구에 적용하였다.

#### 4.1 개별 시스템의 용수공급능력 평가

개별 우수이용 시스템의 용수부족량을 공동 우수이용 시스템에서 보충할 수 있게 설계하기 위하여 개별 우수이용 시스템의 정확한 용수공급능력을 평가하고 공동 우수이용 시스템에서 분담해야 할 용수량을 산정하였다. 그림 2는 강우량 및 지붕면적 그리고 생활용수량에 따른 개별 시스템의 용수공급능력을 파악하기 위하여 도식화한 것이다.

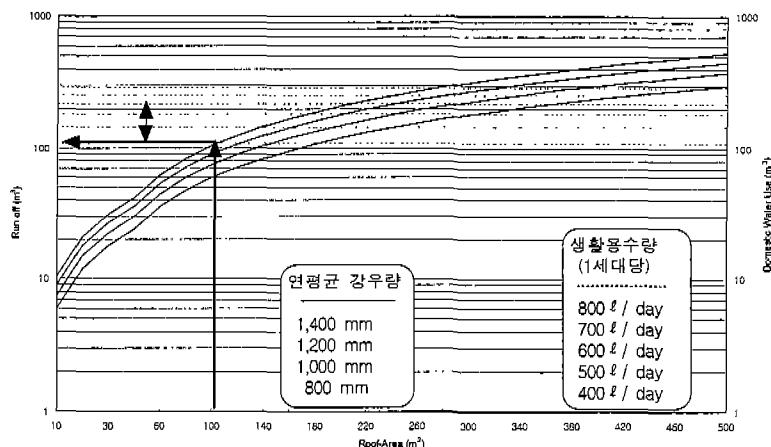


그림 2. 개별 우수이용 시스템의 용수공급능력의 평가

그림 2에서 제주도의 연평균 강우량이 약  $1,400mm$ 이고 지붕면적  $100m^2$ 인 가구의 집수가능량은 연간 약  $100m^3$  이상으로 나타났으며, 가구당 용수량이  $600 \ell/day$ 일 경우에는 연간  $220m^3$ 의 용수량이 필요한 것으로 나타났으므로 개별 용수공급 부담은 40%이다. 따라서 공동 시스템은 60%를 부담하도록 설계해야 한다.

#### 4.2 Run 분석을 이용한 가뭄지표의 산정

표 1은 개별 집수-저류 시스템의 용수공급능력 40%를 부담한 경우의 가뭄지표를 각 용수수요별로 분석한 결과로서  $\sum S_j^+ (m^3)$ 는  $L_j^+$  기간동안 누적잉여량이고  $\sum S_j^-$ 는  $L_j^-$  기간동안의 누적부족

표 1. 개별 용수공급능력 40%일 때 각 용수수요별 가뭄지표

Run Index	Truncation Level ( /day/house )	500	600	700	800
$L_j^-$ (days)		4,159	4,219	4,293	4,330
$\sum S_j^-$ ( $m^3$ )		780	947	1,117	1,290
$I_j^-$ ( $m^3/day$ )		0.19	0.22	0.26	0.30
$\max  S_j^+  (m^3)$		10	11	13	15
$\min  S_j^+  (m^3)$		14	21	27	33

량을 의미하고 있으며, 일평균 부족량인  $I_j^-$  ( $m^3/month$ )는 누적부족량을 부족기간으로 나눈 값을 의미한다. 그리고 Negative Maximum Run-Sum( $\max |S_j^-|$ )은 Negative Run-Sum이 최대로 발생하는 일(日)의 부족량을 의미하고 Minimum Run-Sum( $\min S_j^-$ )은 Run-Sum이 최소로 발생하는 일(日) 부족량을 의미한다.

#### 4.3 공동 우수이용 시스템의 설계

본 연구에서는 개별 집수-저류 시스템의 탱크크기를  $\max |S_j^-|$ ,  $\min S_j^-$ 로 결정하였다. 제주지역의 강우량 발생패턴으로부터 용수공급량을 총족시킬 수 있는 집수면적을 산정하고 각 집수면적별 소요 저류탱크의 용량을 계산하였으며, 이 때 개별 집수-저류 시스템의 용수공급능력이 40%인 경우의 각 용수수요별 집수면적-저류탱크의 크기는 그림 3(a)와 같다.

한편 그림 3(b)는 공동 우수이용 시스템의 집수면적과 탱크크기의 관계로부터 공동 우수이용 시스템의 용수공급 부담이 60%인 경우에 최적의 집수면적과 탱크크기를 분석한 결과이다.

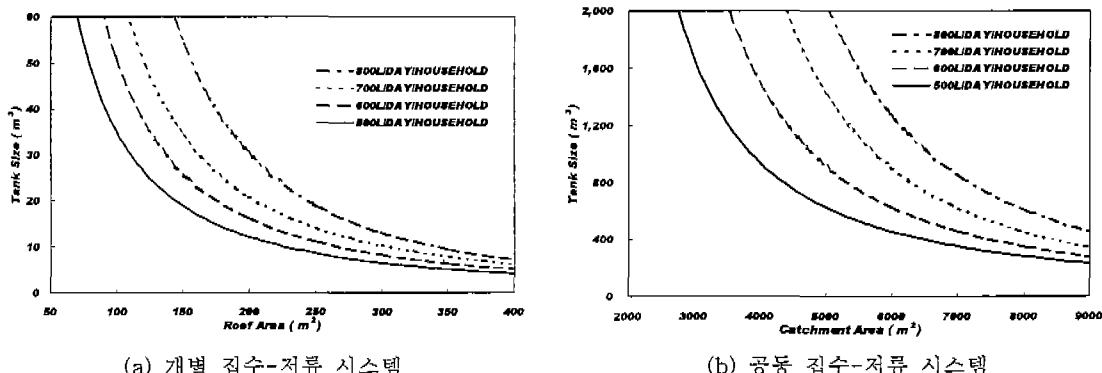


그림 3. 공동 우수이용 시스템의 설계 (용수공급능력 40%인 경우)

#### 4.4 Bayes-Markov 기법에 의한 시스템 운영

##### 1) 사전확률의 분석

제주지역의 일강우량 자료를 순(旬)별 강우량의 크기에 따라 6개의 계급(0~10mm, 11~20mm, 21~30mm, 31~40mm, 41~50mm, 51mm 이상)으로 나누어 강우발생 횟수를 도수분포표로 구성하였으며, 각 도수를 1년 36개 순으로 나누어 사전확률을 구하였다.

##### 2) 우도확률의 계산

우도확률은 Bayes정리에 대한 부가적인 정보를 바탕으로 신뢰도를 높이기 위하여 계산하였으며, 특히 강우자료의 연속적인 특성을 이용하여 보다 적합한 방법을 도출하기 위해서 제1차 Markov 과정으로 분석하였다.

##### 3) 사후확률

사전확률과 우도확률을 산정하고 사후확률을 Bayes 정리에 의해서 결정하였으며, Bayes 정리는 사후확률 분석결과에 의해서 사상의 발생 가능성을 나타내게 된다. 이것은 특정한 사상 뿐만 아니라 모든 사상 중에서 발생 가능성의 정도를 의미한다. 그러므로 여러 가지 사상 중에서 최선의 사상을 의사결정하여 선택한다. 그림 4는 사전확률과 우도확률을 산정하여 결정된 사후확률을 나타내고 있다.

#### 4) 사후확률에 의한 의사결정

본 시스템을 운영할 때에 그림 4에서 나타난 사후확률을 의사결정의 지침으로 제공할 수 있다. 이 경우 순(旬)별 강우량 40mm 이상이 50% 이상의 사후확률을 나타낸다면 일 용수량을 600ℓ로 유지할 수 있다. 그러나 순(旬)별 강우량 30, 20, 10mm가 차지하는 사후확률의 비중이 높아지면 일 용수량을 줄여서 운영해야 한다.

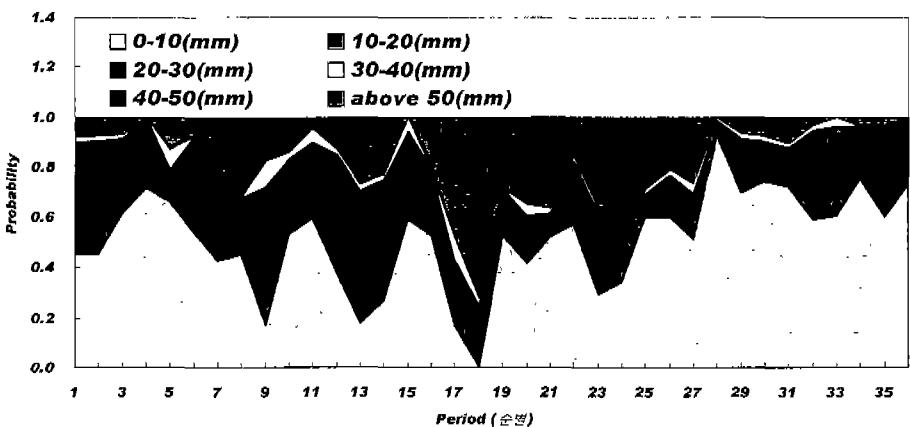


그림 4. 적용지역의 강우량에 대한 순별 사후확률

## 5. 결 론

- 1) 우수이용 시스템을 개별 및 공동 시스템으로 구분하여 호우시 가정의 지붕에서 집수하여 용수로 사용하고 하천수를 도수하거나 유수지 및 공동집수면을 이용하여 집수한 용수를 갈수시에 사용할 수 있도록 설계하였다.
- 2) 본 시스템의 안정적인 운영을 위한 설계에 Run 이론을 적용하여 가구당 평균용수량을 절단수준으로 취하여 기존 가옥의 지붕으로부터의 유출량에 대한 가뭄심도인  $\max |S_j^-|$ 와  $\min S_j$ 를 결정함으로써 우수이용 시스템의 집수면적과 탱크크기를 설계할 수 있었다.
- 3) 본 시스템의 안정적인 운영을 위하여 순별 강우량 자료를 이용하여 Bayes-Markov분석을 통한 사전확률, 우도확률 및 사후확률을 구할 수 있는 기법을 제시함으로써 안정적인 용수공급을 위한 의사결정에 필요한 지침을 제공할 수 있었다.

## 참고문헌

- 지홍기, 이순탁(1977), “일수문량의 Run-Length 및 Run-Sum의 Simulation”, 한국수문학회지, 한국수문학회, 제10권, 제1호, pp. 79-94.  
전인배, 이증석, 지홍기, 이순탁(1999), “도서지역에서의 우수의 생활용수 이용방안에 관한 연구”, 1999년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 185-188.  
South Australian Water Corporation(1996), “Rainwater Tank”, South Australian Water Corporation.