

# Bayes-Markov 기법에 의한 우수집수탱크의 설계

김효준\*, 전인배\*\*, 지홍기\*\*\*, 이순탁\*\*\*

## 1. 서론

하천이 발달되지 않아 지표수를 얻기 어렵고 지하수의 취수가 불가능한 중소규모의 도서 또는 화산도서 등의 지역에서는 재래적 방법의 하나인 빗물을 받아서 음용수로 이용해 왔으나 지금까지 비과학적인 관습에 의존해 옴으로써 용수의 이용에 있어서 영세성을 면치 못하고 어려움을 겪어왔다.

특히, 도서지역을 대상으로 새로운 용수원을 확보하기 위하여 최근에는 정부로부터 해수의 담수화 사업을 전개하고 있으나 시설투자의 과다 그리고 고 에너지 소비에 대한 비용부담은 결과적으로 주민들에게 큰 부담을 주게 될 것으로 예상되고 있다. 이러한 도서지역의 고비용 및 비과학적인 용수이용방법을 해결하기 위해서는 재래적인 우수이용방법을 보다 수문학적 지식에 의해서 정량화 및 표준화할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 우수-집수 시스템이 강우량, 집수면적, 저류탱크의 크기 및 생활용수 소비량에 지배된다. 그러나 강우량은 임의로 조절할 수 없는 변수이기 때문에 확률적인 정보로서 Bayes-Markov 기법에 의해서 모의된 확률 강우량 정보와 생활용수 소비패턴에 따라 결정할 수 있도록 설계하였다. 한편, 본 연구에서 강우발생특성과 용수이용패턴에 따른 우수집수 시스템 설계에 Bayes-Markov 기법을 적용하여 본 시스템의 운영에 따른 평가를 실시하였으며, 그 결과의 안정성이 확인되었다.

## 2. Bayes-Markov 기법의 기본이론

Bayes-Markov 기법으로 추정된 강우발생특성은 본 시스템의 설계를 위한 기본적인 자료이며, 이 확률적인 정보는 안정적인 용수공급을 위한 용수관리의 의사결정에 적합하다.

### 2.1 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 부르고 식 (1)과 같이 나타낸다.

---

\* 영남대학교 대학원 석사과정  
\*\* 영남대학교 대학원 석사과정 수료  
\*\*\* 영남대학교 토목공학과 교수

$$P(O|Y) = \frac{P(O \cap Y)}{P(Y)} \quad (1)$$

조건부확률  $P(O|Y)$ 는  $P(O)$ 보다 클 수도 작을 수도 있다. Bayes 정리에서의 우도확률은 사전확률이 수정될 수도 있고 수정과정에서 결과까지의 확률은 사후확률이라 한다. 사후확률에서 모든 사전 표본정보는 사후확률로 통합하고 사전정보는 사전확률에 의해 사후확률로 하여 모든 표본 정보를 우도함수로 취급한다.

사상 Y가 발생했다는 조건하에 다른 한 사상 O가 발생하게 될 확률을  $P(O|Y)$ 라 하고, 또한 발생하지 않은 경우 발생한다고 잘못 판단할 조건부확률을  $P(Y|X)$ , 발생하지 않는다고 제대로 판단할 조건부확률을  $P(N|X)$ 을 나타내며, 발생한다고 바르게 판단하게 될 조건부확률  $P(Y|O)$ , 발생하지 않는다고 그릇된 판단을 할 조건부확률  $P(N|O)$ 을 식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$P(O|Y) = \frac{P(O) \cdot P(Y|O)}{P(O) \cdot P(Y|O) + P(X) \cdot P(Y|X)} \quad (2)$$

## 2.2 Markov 모델

제1차 Markov 모형은 표본자료의 연속적 특성과의 관계를 강우량 자료의 추계학적 발생에 이용한다. 어떤 시행결과와는 바로 직전의 시행결과에 지배만을 받는다. 하나 이상의 사전시행이 현재의 시행결과에 영향을 미친다면 하나 이상의 자료발생 모형에서 2차, 3차 등을 추가하는 것이 더 명확하다.

식 (3)은 제1차 Markov 모형의 형태를 나타내고 있다.

$$Q_{i,j} = \overline{Q}_j + b_j(Q_{i,j-1} - \overline{Q}_{j-1}) + t\sigma_j(1 - r_j^2)^{1/2} \quad (3)$$

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

## 3. 우수이용 시스템의 구성

강우-집수-저류-용수 사이의 관계로부터 최적의 집수면적과 탱크크기를 결정하기 위하여 집수면적-탱크크기-용수공급 시스템을 구축하고 이들의 상관성을 검토하였다.

그림 1은 지붕면에 내리는 강우를 저류탱크에서 저류하여 생활용수로 공급하는 시스템을 나타내고 있다.

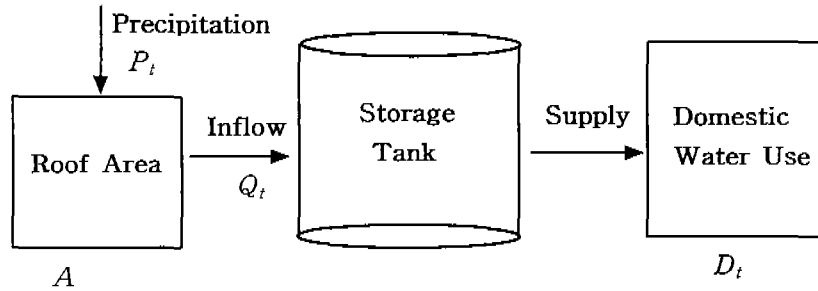


그림 1. 우수-집수-저류-용수공급 시스템

강우에 의해 집수면으로부터 임의의 t월에 저류탱크로 유입할 수 있는 유량  $Q_t(m^3/month)$ 은 집수면적  $A(m^2)$ 와 t월의 강우량  $P_t(mm/month)$ 의 곱에 유출계수 C를 곱하여 산정한다. 식 (4)를 이용하여 간단히 나타내었다.

$$Q_t = \frac{A \times P_t \times C}{1000} \quad (4)$$

여기서, C는 우수가 집수면의 재질, 증발 등에 의한 손실을 고려한 유출계수로서 0.75를 사용한다. 결정된 탱크크기에 대한 안정성을 검토하기 위해 집수면으로부터 임의의 t월에 얻어지는 유출량  $Q_t(m^3/month)$ 와 t월의 최초의 저류량  $S_{t-1}(m^3)$ 을 합하여 t월에 유입된 총유입량을 구하고 t월 30일 동안의 용수량  $D_t(m^3/month)$ 의 차를 구함으로써 t월말에 남은 탱크의 저류량  $S_t(m^3)$ 를 구한다. 식 (5)는 이를 간단히 나타낸 것이다.

$$S_t = \min [\max [(S_{t-1} + Q_t - D_t), 0], T] \quad (5)$$

#### 4. Bayes-Markov의 추계학적 분석 및 적용

순별 강우자료를 이용하여 사전강우확률을 산정하고 1차 Markov과정을 응용하여 우도확률을 계산한 후 Bayes정리를 적용하여 사후확률을 결정하였으며, 대상지역의 강우발생특성을 규명하였다.

##### 4.1 적용지역의 선정

적용지역은 지표수가 없고 생활용수의 대부분을 지하수에 의존하고 있는 제주도를 선정하였으며, 이 지역의 1986년 1월 ~ 1999년 12월까지의 일강우량 자료를 사용하여 분석하였다.

##### 4.2 사전확률의 분석

사전확률은 추가적인 증거가 축적되기 전에 모형의 사전 매개변수 정보로 표현된다. 사전 정보의 특성을 고려함으로써 사전 정보와 다른 분석에 대해 유용하고 합리적이며, 과학적인 방법을 발생시킬 수 있다. 또한 다른 형태의 정보는 우연사상에서 발생할 수도 있다.

제주지역의 일강우량 자료를 순단위의 강우량으로 계산하면 1년에 36개의 순으로 나타난다. 순별 강우량의 크기에 따라 6개의 계급(0~10mm, 11~20mm, 21~30mm, 31~40mm, 41~50mm, 51mm이상)으로 나누어 강우발생횟수를 도수로 하는 도수분포표를 만들 수 있으며, 이 때 각 계급별 합은 대상기간인 14가 되어야 한다.

마지막 단계는 각 도수를 1년 36개 순으로 나누어 사전확률을 구할 수 있으며, 이 때 사전확률의 합은 1이 되어야 한다.

#### 4.3 우도확률의 계산

우도확률은 Bayes정리에 대한 추가적인 정보를 바탕으로 신뢰도를 높이기 위하여 계산하며, 특히 강우자료의 연속적인 특성을 이용하여 보다 적합한 방법을 도출하기 위하여 제1차 Markov과정으로 분석하였다.

#### 4.4 사후확률

사전확률과 우도확률을 산정하고 사후확률을 Bayes정리에 의해 결정하였다. 사후확률의 분석된 결과치에 의해 Bayes 정리는 사상 발생 가능성이 높다는 것을 나타낸다. 이것은 단지 특정한 사상을 고려한 모든 사상 중에 가장 발생 가능성이 높다는 것을 의미한다. 그러므로 여러 가지 중 최선의 사상을 의사결정하여 선택한다.

그림 2은 사전확률과 우도확률을 산정하여 결정된 사후확률을 나타내고 있다.

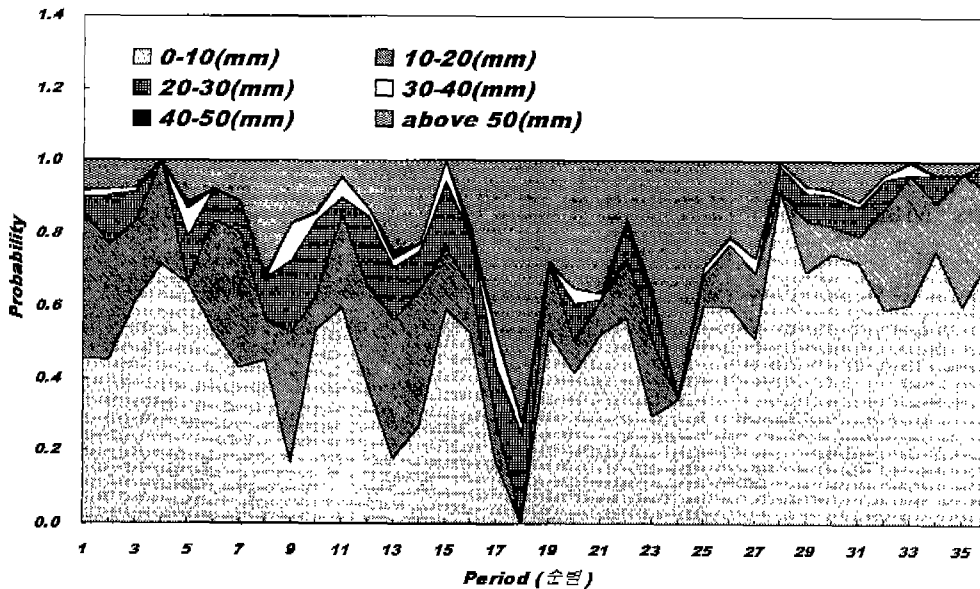


그림 2. 적용지역의 강우량에 대한 순별 사후확률

#### 4.5 우수집수탱크의 설계

Bayes-Markov 분석을 통해 적합한 사후확률을 결정할 수 있었고, 우수집수탱크의 설계를 결정하는데 이용하였다.

##### 1) 일계 강우량 및 연속 최대 갈수기간의 결정

적용지역의 임의의 가구를 선정하였을 때 기존의 지붕면적은  $150\text{ m}^2$ 이고 갈수시 용수수요량은  $200\text{ l/day/household}$ 이면 순(旬)별로 용수를 안정적으로 공급할 수 있는 최대의 강우량 (일계강우량)은 식(1)을 이용하여 계산하면  $35.5\text{ mm/순}$  이 필요하였다.

그림 2의 강우량에 따른 순별 사후확률을 이용하여 강우량이  $35.5\text{ mm}$ 미만이 되는 연속 최대 갈수기간을 선정한 결과 최대 갈수기간은 12순(120일)으로 나타났다.

##### 2) 공급가능기간 및 탱크크기의 결정

그림 3은 Chinn, S.W.(U.S. Geological Survey, 1965)가 제안한 방법에 따라 용수공급가능기간-일 용수량-탱크크기의 관계를 나타내는 노모그램을 작성하였다. 최대 갈수기간이 120일이므로 용수공급가능기간을 120일이고 일 용수량은  $200\text{ l/day/household}$ 이므로 두 조건을 연장한 직선에 의하여 탱크크기는  $32\text{ m}^3$ 로 결정되었다.

동일한 방법으로 집수면적  $50\sim 400\text{ m}^2$ , 갈수시 용수수요량  $100\sim 400\text{ l/day/household}$ 에 대하여 분석한 결과 그림 4와 같이 나타났다.

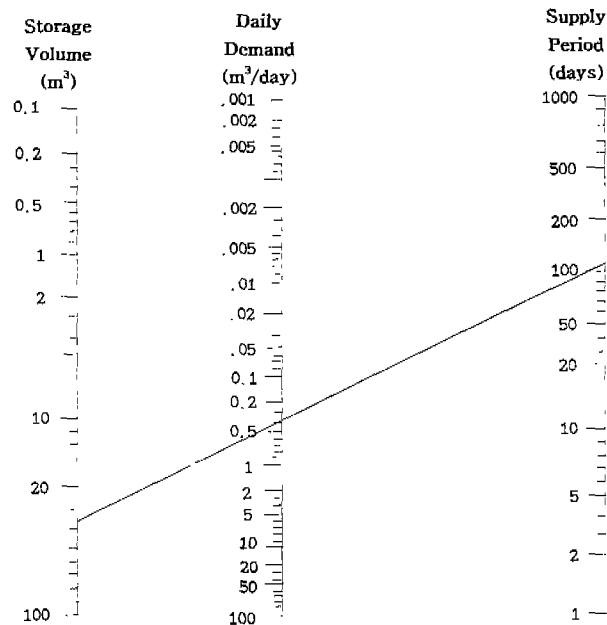


그림 3. 용수공급가능기간-일 용수량-탱크크기의 관계를 나타내는 노모그램

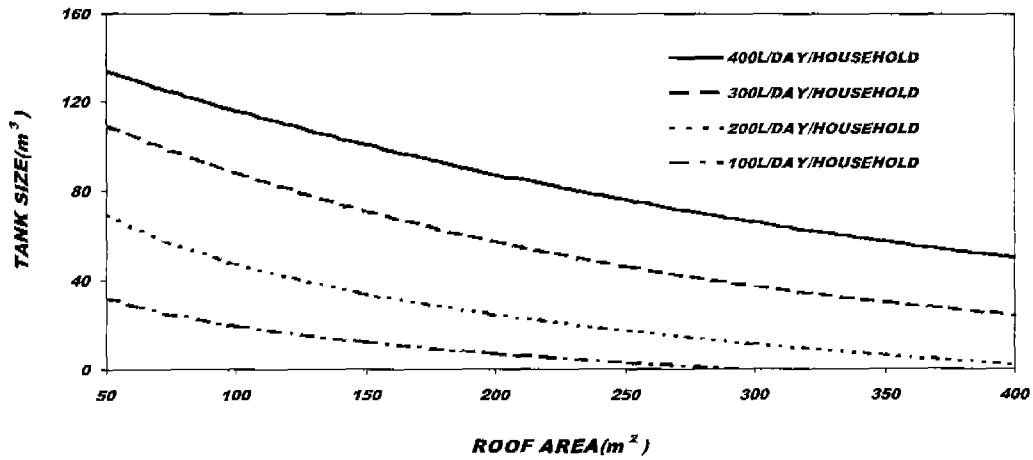


그림 4. 용수량별 지붕면적과 탱크크기와의 관계

## 5. 결론

본 연구에서는 제주지역의 순별 강우량을 이용하여 강우발생특성을 분석하고 그 특성을 이용하여 우수집수 시스템을 안정적으로 운영할 수 있도록 탱크크기와 집수면적을 설계하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 이 지역의 순별 강우량자료를 이용하여 Bayes-Markov분석을 통한 사전확률, 우도확률, 사후확률을 구하여 안정적인 용수공급 및 수요를 위한 의사결정을 할 수 있는 지침을 제공할 수 있었다.
- 2) Bayes-Markov분석을 통해 구해진 사후확률과 본 연구에서 작성된 노모그램을 이용하여 적합한 탱크크기와 집수면적을 설계할 수 있었다.

## 참고문헌

1. 전인배, 이중석, 지홍기, 이순탁(1999), "도서지역에서의 우수의 생활용수 이용방안에 관한 연구", 대한토목학회, 대한토목학회 학술발표회, pp.185-188
2. Adhityan Appan(1983), "Technology and Processes in Rainwater Catchment Systems"
3. Fok, Y.S., Murabayashi, E.T. and Fong, R.H.L.(1979), "Rainwater Roof-Catchment Cistern System for Residential Water Supply", In III World Congress on Water Resources Proceedings.
4. Gary W. Frasier, Lloyd E. Myers(1990), "Handbook of Water Harvesting", Water Resources Publications
5. Yu-Si Fok, Ronald H. L Fong, Jack Hung(1980), "Bayes-Markov Analysis for Rain-Catchment Cisterns", Water Resources Center, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii
6. Chinn, S.W.(1965), Water-Supply potential from an asphalt-lined catchment near Holualoa, Kona, Hawaii, Water Supply Paper No. 1809-P, U.S Geological Survey