

우수이용 시스템 시뮬레이션 모형

○ 전인배¹⁾, 송시훈²⁾, 지홍기³⁾, 이순탁³⁾

1. 서 론

건설교통부의 수자원장기종합계획(Water Vision 2020)에 따르면 우리나라는 2006년부터 연간 4억톤, 2011년부터는 연간 20억톤의 수자원이 더 필요한 것으로 전망하고 있다. 지금까지 우리나라는 하천수가 총 수자원량의 14%에 불과함에도 불구하고 90%이상 하천수 등의 지표수에 의존하고 있는 실정으로 장기간의 가뭄이나 하천의 오염이 발생할 경우에는 용수의 공급이 어렵게 된다. 이러한 어려움을 극복하고 생활용수의 안정적인 공급을 위하여 다양한 용수원의 개발이 필요하다.

특히 도서지방에서 상수도 시설의 설치는 지리적인 제약으로 사실상 불가능하고 해수담수화 시설의 설치는 건설비용 및 유지관리비용의 부담이 커서 결과적으로 주민들에게 큰 부담을 주게 될 것으로 예상되고 있다. 따라서 우수를 용수원으로 활용한 시스템을 개발한다면 저비용으로 지속적인 자체 용수원을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

이러한 연구의 필요성으로 국내외의 관련문헌등을 수집하고 검토하였으며, 제주도를 연구대상 지역으로 설정하여 우수를 용수원으로 하는 우수이용 시스템을 설계하는 기법을 연구하였다.

본 연구에서는 이러한 연구성과를 바탕으로 하여 제주도뿐만 아니라 일반 도서지역에서도 강우자료를 이용하여 기존의 지붕면적에 대한 최적의 탱크크기를 설계하고 모의할 수 있는 모형을 개발하였다.

우수이용 시스템 시뮬레이션 모형은 3개의 모형으로 구성되어 있는데 첫 번째 모형은 연구대상지역의 강우량이라는 모집단에서 용수가 가장 부족했던 기간을 선별하는 용수부족기간 결정 모형이고, 두 번째 모형은 선정된 용수부족기간의 자료와 기존의 지붕면적을 이용하여 최적의 탱크 크기를 결정하는 최적 시스템 설계 모형이며, 세 번째 모형은 시스템 운영자가 설계한 우수이용 시스템을 안정적으로 운영할 수 있도록 용수의 수요와 공급의 정보를 제공하는 운영자 의사결정을 위한 모형이다.

우수이용 시스템의 시뮬레이션 모형의 개발을 통하여 제주도뿐만 아니라 이와 유사한 국내 서·남해안 도서지역에서도 본 시스템의 적용이 용이하게 될 것으로 판단되며, 본 시스템 및 시스템 모형화에 대한 지속적인 연구를 통하여 보다 경제적이고 안정적인 시스템 설계가 가능한 범용적인 모형의 개발을 할 수 있을 것이다.

-
- 1) 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 연구원
 - 2) 영남대학교 공과대학 토목공학과 박사과정
 - 3) 영남대학교 공과대학 토목공학과 교수

2. 우수이용 시스템의 구성

우수이용 시스템을 강우를 집수하는 집수 시스템(catchment system), 집수된 우수를 저장하는 저류 시스템(storage system) 그리고 저류된 우수를 가정으로 보내주는 공급 시스템(supply system)으로 구분하였다.

2.1 우수집수-저류 시스템

집수면에 의해서 집수된 우수의 양은 집수면의 크기나 재료의 재질에 의해 변화하게 된다. 이때 집수면적 A 는 집수면이 바닥에 투영된 면적으로 나타낸다. 따라서 집수면(A)으로부터 임의의 t 월에 얻어지는 유입량 Q_t ($m^3/month$)는 강우에 의해서 집수면으로부터 저류탱크로 임의의 t 월에 유입할 수 있는 유출량을 나타내고 있으며, 이 때 집수면적 A (m^2), t 월의 강우량 P_t ($mm/month$) 및 유출계수 C 를 곱해서 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_t = KCAP_t \quad (1)$$

여기서, K 는 단위 환산계수이고 C 는 우수가 집수면의 재질, 증발 등에 의해서 발생하는 손실을 고려한 유출계수로서 지붕은 일반적으로 0.75를 취하고 있다.

우수집수 시스템을 통하여 집수된 우수는 우수저류 시스템에 저장하였다가 생활용수로 활용하게 된다. 그림 1은 우수집수-저류 시스템의 모식도이고, 이 시스템의 설계에서 저류탱크의 크기는 용수공급 능력에 가장 큰 영향을 미친다. 결국 이 시스템의 효율을 극대화시키기 위해서는 저류탱크에 대한 최적의 크기를 결정해야 한다.

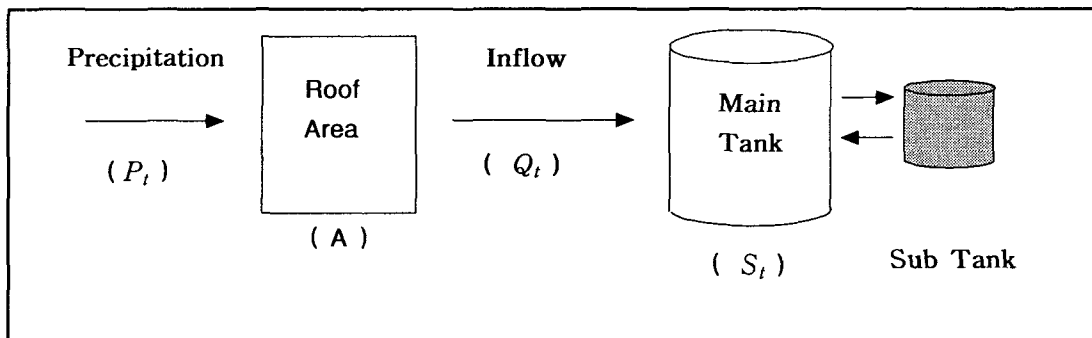


그림 1 우수집수-저류 시스템

2.2 우수공급 시스템

우수공급 시스템은 그림 2와 같이 저류된 우수를 가정에서 생활용수로 활용할 수 있게 공급하는 시스템이다. 우수집수탱크에서 저류량의 시간에 따른 변화를 파악하기 위해 집수면(A)으로부터 임의의 t 월에 얻어지는 유입량 Q_t ($m^3/month$)와 t 월의 최초 저류량 S_{t-1} (m^3)을 합하여 t 월에 유입된 총유입량을 구하고 t 월 30일 동안의 용수 수요량 D_t ($m^3/month$)의 차를 구함으로써 t 월말에 남은 탱크의 저류량 S_t (m^3)를 식(2)와 같이 간단히 나타낼 수 있다.

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

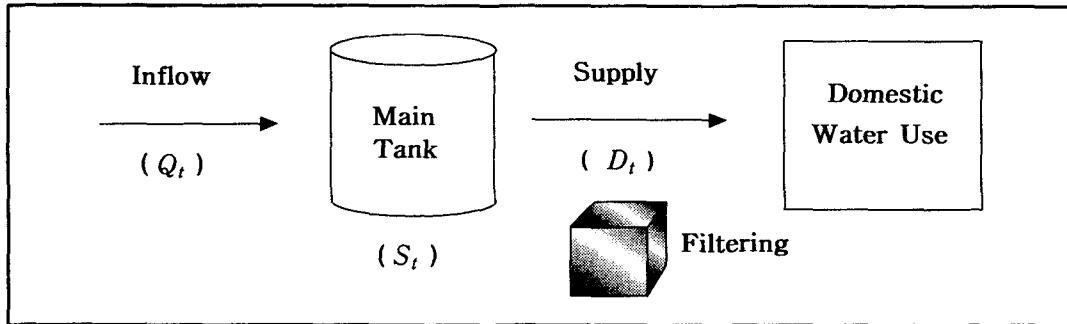


그림 2 우수공급 시스템

3. 우수이용 시스템 시뮬레이션 모형

우수이용 시스템 시뮬레이션 모형은 용수부족기간 결정 모형(DDP Model), 최적시스템 설계 모형(DOS Model), 운영자 의사결정을 위한 모형(ODD Model)으로 구성되어 있다.

3.1 용수부족기간 결정 모형(Model for Decision of Drought Period)

수공구조물을 설계하기 위하여 기본으로 사용되는 강우사상은 두 가지 형태로 구분할 수 있다.

첫째는 강우기록의 IDF 해석에 근거한 설계호우라는 인위적 사상이고, 둘째는 실제강우기록을 직접 사용하는 것이다. 본 연구에서는 첨두유량보다는 유출체적이나 수질이 중요한 문제이므로 실강우자료를 이용하여 용수부족기간을 결정하고 우수이용 시스템을 설계하였다.

그림 3은 연구대상 지역의 월강우자료를 이용하여 집수면적별로 유출량을 계산하고 이 값으로부터 저류탱크에 유입되는 유입량 시계열 자료를 만들었으며, 가구당 일평균 용수량을 월평균 용수량으로 계산하여 절단수준으로 취하고 이로부터 Run이론에 의한 가뭄지수를 결정하는 과정을 나타내고 있다.

가뭄지수에는 용수부족 지속기간, 용수 누가 부족량, 월평균 부족량 등으로 나타낼 수 있으나 본 시스템의 집수면적과 탱크크기를 설계할 경우에는 시계열 자료에서 가장 가뭄이 심각한 시기 및 심도를 정량적으로 판단할

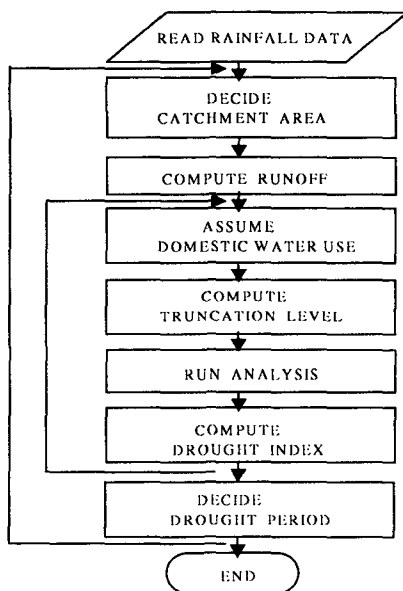


그림 3 DDP 모형을 단순화한 순서도

수 있는 가뭄지수인 최대 용수부족기간과 최대 용수누가 부족량을 설계에 이용하였다.

3.2 최적 시스템 설계 모형(Model for Design of Optimum System)

그림 4는 최적의 우수이용 시스템을 설계하기 위한 과정을 나타내고 있다. 기존의 지붕에 대한 집수면적과 일평균 생활용수량으로부터 탱크의 크기를 가정하고 DDP 모형에 의하여 결정한 용수 부족기간의 경우자료를 이용하여 집수면에서의 유입량을 추정하고 그 결과를 본 시스템에 직접 적용하여 탱크의 저류량 변화를 분석하였다.

초기에 가정한 탱크의 크기가 본 시스템을 안정적으로 운영할 수 있는지에 대하여 탱크의 저류량 변화를 파악하여 불만족스러운 경우에는 탱크의 크기를 단계적으로 조정하여 다시 시스템의 모의하였다. 이러한 반복된 과정에서 최초로 안정적인 시스템의 운영이 가능하게 될 때의 탱크 크기를 집수면적에 대한 최적의 탱크크기로 결정하였다.

3.3 운영자 의사결정을 위한 모형(Model for Operator's Discussion Decision)

그림 5는 이미 설계한 우수이용 시스템을 안정적으로 운영하기 위하여 운영자에게 의사결정을 할 수 있는 사전정보를 도출하기 위한 과정을 나타내고 있다. 연구대상 지역의 일강우자료를 크기에 따라 몇 개의 계급으로 분류하고 계급에 대응하는 강우의 횟수를 도수로 하는 도수분포표를 이용하여 사전확률을 계산하였다. 그리고 강우자료의 연속적인 특성을 이용하여 보다 적합한 방법을 도출하기 위하여 제1차 Markov 과정으로 분석하여 우도확률을 계산하였으며 지금까지 계산한 사전확률과 우도확률을 Bayes정리를 이용하여 사후확률을 계산하였다.

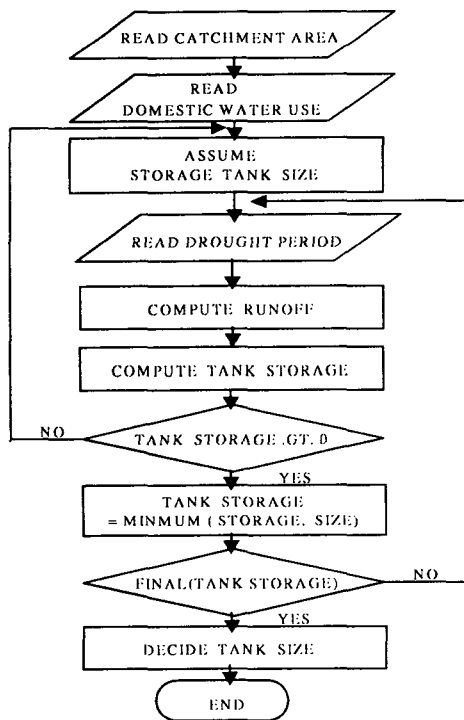


그림 4 DOS 모형을 단순화한 순서도

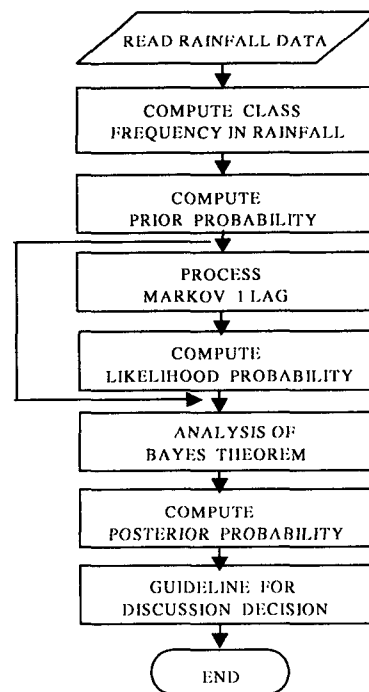


그림 5 ODD 모형을 단순화한 순서도

4. 우수이용 시스템 시뮬레이션 모형의 적용

우수이용 시스템의 설계 및 안정적인 운영을 위하여 개발한 시뮬레이션 모형인 DDP, DOS, ODD 모형을 이용하여 실제 연구대상지역에 적용을 하였다. 본 연구의 대상지역은 도서지역인 제주도를 선택하였으며, 이 지역은 인근에 8개의 유인도가 있어서 본 시스템의 도입이 매우 절실하고 강우 및 용수의 기초자료가 비교적 풍부한 지역이다.

4.1 DDP 모형을 이용한 용수부족기간의 결정

제주관측소에서 관측한 월강우자료를 이용하여 집수면적(100,200,300,400,500m²)별로 집수면에서 유입되는 월유입량을 환산하고 가구별 일평균 용수량(100,200,300,400,500 l/day)을 월평균 용수량으로 환산하여 절단수준으로 취하고 이로부터 Run이론에 의한 가뭄지수를 결정하였다.

표 1은 가뭄지수를 이용하여 용수부족 기간을 산정한 결과를 나타내고 있으며, 제주도는 1987, 1988, 1995, 1997년말에 각각 생활용수 부족이 크게 발생했음을 알 수 있었다.

표 1 DDP 모형에 의해서 분석된 용수부족 기간

용수부족 개월수 (개월)	부족 기간 (년 월)	용수부족 개월수 (개월)	부족 기간 (년 월)
1	1997. 10	11	1988. 8 - 1989. 6
2	1988. 10 - 1988. 11	21	1996. 7 - 1998. 3
3	1988. 10 - 1988. 12	23	1996. 7 - 1998. 5
4	1995. 11 - 1996. 2	45	1974. 9 - 1978. 5
5	1987. 9 - 1988. 1	49	1974. 8 - 1978. 8
6	1987. 9 - 1988. 2	59	1974. 8 - 1979. 6
8	1999. 10 - 2000. 5	71	1987. 9 - 1993. 7
10	1982. 9 - 1983. 6	-	-

4.2 DOS 모형을 이용한 최적 시스템의 설계

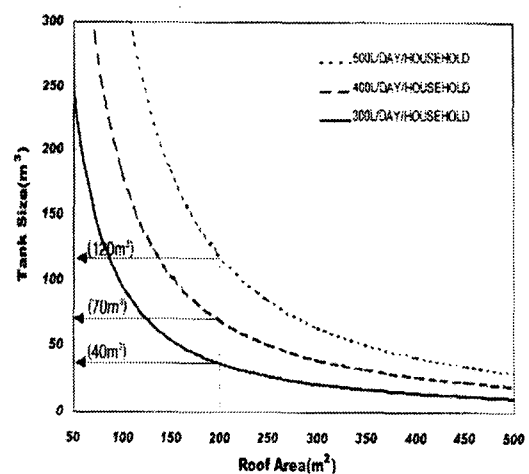
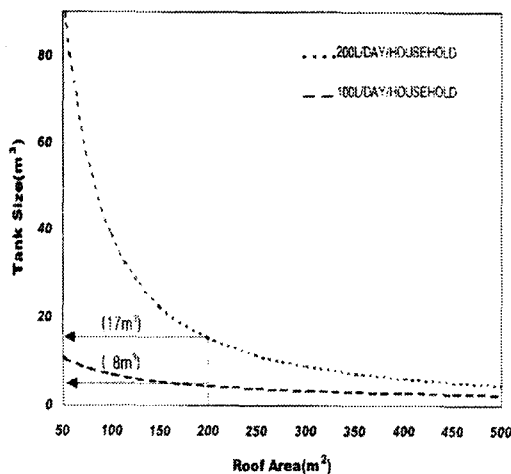


그림 6 시스템의 설계(용수량 100,200 l/day) 그림 7 시스템의 설계(용수량 300~500 l/day)

그림 6 및 그림 7은 용수량의 규모에 따른 집수면적과 탱크크기의 관계를 나타내고 있다. 이들 그림에서 집수면적 200m²인 가구의 경우 가구당 일평균 용수량이 100, 200, 300, 400, 500 l로 변함에 따라 용수를 안정적으로 공급하기 위한 최적의 탱크크기는 각각 8, 17, 40, 70, 120m³인 것으로 나타났다.

4.3 ODD 모형을 이용한 운영자 의사결정을 위한 사전정보

ODD 모형을 이용하여 1년 52개 주에 대하여 강수량 크기의 계급에 따른 사후확률을 산정하여 본 시스템 운영자의 의사결정을 위한 사전정보를 제공할 수 있는 결과를 도출하였으며 현시점의 탱크저류량에 대하여 미래의 강우사상을 예측하여 용수가 부족한 경우 사전에 준비를 함으로써 지속적인 용수공급이 가능하다.

5. 결론

본 연구에서는 제주지역의 강수량 자료와 세대별 생활용수량 자료를 이용하였으며 이 지역의 생활용수를 안정적으로 공급할 수 있는 최적의 우수이용 시스템을 설계하기 위한 3개의 모형을 제시하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 용수부족기간 결정 모형은 여러 가지의 가뭄지수 산정방법 중 강우부족이 아닌 용수공급의 부족을 반영하고 있는 Run이론을 이용하여 가뭄지수를 산정하였으며, 가뭄지수 중 가뭄지속 기간이나 용수부족량을 분석하여 용수부족기간을 결정할 수 있는 모형이다.
- 2) 최적 시스템 설계 모형은 용수부족기간 결정 모형에서 분석한 용수부족기간과 기존의 지붕면적을 이용하여 모의함으로써 최적의 탱크크기를 설계할 수 있는 모형이다.
- 3) 운영자 의사결정을 위한 모형은 제주도의 강우자료를 이용하였으며 Bayes-Markov분석을 통하여 사후확률을 산출하고 그 결과를 사용자의 의사결정을 위한 사전정보로 활용할 수 있게 만든 모형이다.
- 4) 위의 3개의 모형을 연계함으로써 합리적인 시스템 설계 및 운영이 가능하게 되었으며 범용적인 모형 개발이 가능하다고 판단된다.

6. 참고문헌

- 지흥기, 이순탁(1977), "일수문량의 Run-Length 및 Run-Sum의 Simulation", 한국수문학회지, 한국수문학회, 제10권, 제1호, pp. 79-94.
- 전인배, 송시훈, 지흥기, 이순탁(2001), "우수이용 시스템의 설계기법", 한국수자원학회 논문집, 제34권, 제 6호, pp. 587-596.
- Yu-Si Fok, Ronald H.L. Fong, Jack Hung (1980), "Bayes-Markov Analysis for Rain-Catchment Cisterns", Water Resources Research Center, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- Texas Water Development Board in Cooperation with the Center for Maximum Potential Building Systems (1997), "Texas Guide to Rainwater Harvesting".