

## 가뭄 예·경보 시스템에 의한 저수지 운영



이재응 >>  
아주대학교 환경건설교통공학부 부교수



김문모 >>  
신구대학 토목공학과 부교수

### 1. 서론

국내에서는 1990년대 초까지 가뭄의 감시나 예측 등에 대한 체계적인 연구가 많이 없었으나 1990년대 중반 이후 가뭄으로 인한 피해가 심각해짐에 따라 가뭄에 관한 관심이 증대되고 있다. 간략히 1990년대 중반까지 가뭄과 관련된 연구를 살펴보면 다음과 같다. 기상연구소(1993)는 강수량 변동을 이용하여 우리나라의 가뭄특성에 대하여 연구하였으며, 최영진(1994) 등은 기후자료를 이용하여 Palmer 가뭄지수와 습윤 이상지수를 비교·분석하였다. 김현영(1995)은 우리나라의 가뭄을 정의하고 그 특성에 대해 논하였고, 김현준(1995)은 1994년과 1995년에 발생하였

던 가뭄의 특징에 대해서 조사하였다. 조홍제(1996)는 Phillips 가뭄지수를 사용하여 비상 가뭄대책 수립에 활용하였다. 그러나 가뭄과 관련된 연구는 우리나라의 전반적인 가뭄의 특성을 조사하거나, 외국에서 개발된 각종 가뭄지수를 우리나라에 적용하는 것이 대부분이었으므로, 가뭄발생 시 실질적으로 가뭄 피해 감소를 위해 적용할 수 있는 방안에 대한 연구는 많지 않다.

또한 우리나라의 가뭄대책은 1994~1995년 가뭄과 2001년 봄 가뭄 시의 대처에서 나타났듯이 가뭄대비계획은 충분한 준비가 되어 있지 못하고, 가뭄이 심한 지역을 정부가 일방적으로 지원하는 형식의 긴급대책들이 대부분이었다. 즉 사전에 준비된 가뭄대비계획보다는 이미 가뭄이 상당히 진행된 후 수행되는 사후 긴급가뭄대책에 의존하고 있다. 우리나라에서 가뭄은 대개 10월부터 다음해 3월까지 약 5개월 동안에 가뭄이 발생하며, 6월부터 9월까지 3개월 동안은 호우가 발생하는 극단적인 기상 양상을 가지고 있기 때문에, 기상 상황이 상이한 외국에서 얻어진 가뭄 관련 이론을 그대로 우리나라에 적용하는 데는 문제가 발생할 여지가 있고, 지속적으로 반복되는 가뭄이라는 자연 재해에 대해서 현재와 같은 긴급대책들은 체계적이고 조직적인 사전 가뭄경감대책으로 확장되어야 할 필요성이 있다.

지금까지 이미 발생하였던 가뭄을 분석하는 연구

가 주종을 이루어 왔고, 가뭄의 예·경보에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는데, 이는 첫째, 홍수 예·경보와는 달리 가뭄 예·경보는 가뭄의 지속기간이 길기 때문에 장기간의 기상 예측이 필요하지만 이에 대한 신뢰성 있는 연구가 부족하고, 둘째, 지역 강우 분석 및 예측, 기온, 증·발산, 토양습도와 같은 수문 자료 취득과 분석, 각종 용수수요 현황 및 전망, 지표수, 지하수, 저수지를 포함하는 용수공급 가능량 현황 및 전망 등 기상 및 수자원의 거의 전 분야에 대한 포괄적인 분석이 필요하며, 셋째, 가뭄 예·경보가 발효된 이후 실질적인 가뭄피해 방지대책을 수행하기 위해서 오랜 기간이 필요할 뿐만 아니라, 상당 기간 이전에 준비하지 않는 한 그 실효성도 떨어지기 때문이라고 판단된다.

본 글에서는 가뭄 예·경보를 실시하고, 가뭄이 예측될 경우 적절한 저수지 운영을 통하여 가뭄으로 인한 용수공급 피해를 최소화할 수 있는 방안에 대해 검토한다. 이를 위해 용담댐 유역을 시범유역으로 선정하여 가뭄 시 저수지 운영방안을 검토하였다.

## 2. 하천유량을 이용한 가뭄지수와 가뭄 예·경보

가뭄 예·경보를 위해서는 앞으로의 가뭄 상태에 따라 주의보, 경보, 비상 상태를 발령할 수 있는 지표를 설정해야 한다. 가뭄을 한 가지 변수로 완전히 나타낸다는 것은 어려운 일이기 때문에 다음 과정과 같이 Palmer지수와 하천유량을 그 지역의 가뭄을 나타내는 지표로 사용하였다.

먼저 하천유량을 식 (1)과 같이 무차원 시계열로 정규화시킨다.

$$N_{i, k, n} = \frac{X_{i, k, n} - \bar{X}_{k, n}}{S_{k, n}} \quad (1)$$

i는 시계열의 순서이고, k는 i와 관련된 월, n은 유역 내 수위관측소의 개수,  $N_{i, k, n}$ 은 월별 용담댐 유입량,  $X_{i, k, n}$ 은 월별 용담댐 평균 유입량,  $\bar{X}_{k, n}$ 은 월 하

천유량의 표준편차,  $S_{k, n}$ 은 월 하천유량 k의 표준편차이다.

$$RPDSI_{i, k} = \alpha \times PDSI_{i, k} + \beta \times R_{i, k} \quad (2)$$

여기서  $RPDSI_{i, k}$ (River and Palmer Drought Severity Index)는 새로운 가뭄지수이고,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 유역의 상황에 따라 결정되는 상수로  $\alpha + \beta = 1$ 이다. 이러한 가뭄지수는 수문·기상학적 인자들 이외에 수자원적 인자를 포함하고 있으므로 Palmer 지수의 단점을 보완하여 해당지역의 가뭄을 좀 더 잘 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

그리고 Weibull 공식을 이용하여 RPDSI의 초과확률을 산정한다.

$$P = m/(n+1) \quad (3)$$

여기서 P는 초과확률, n은 전체 자료 수, m은 자료의 순위를 나타낸다.

## 3. 가뭄 예·경보에 따른 용담 저수지 운영

용담댐은 용수공급, 발전, 홍수조절을 실시하는 다목적댐으로 목표연도 2021년까지 전주권으로 135만  $m^3$ /일을 공급할 목적으로 건설되었다. 목표연도 이전까지는 전주권의 인구증가 추세와 병행하여 공급량을 탄력적으로 운영하게 되며 용담댐 하류의 생활용수, 공업용수, 하천유지용수의 공급과 대청댐의 저수지 내 용수공급에 필요한 수요를 충족시킬 수 있도록 운영하고 있다. 용담댐 하류로의 방류량은 저수량과 유입량에 따라 결정하며 용담댐 건설 이전 댐 지점을 흐르던 유량 이상인 최소  $5m^3/s$ 를 상시 방류하여 댐 하류의 평시 유량을 보장하고, 홍수시나 극심한 가뭄의 발생 시에는 용담댐으로의 유입량과 저수지의 저수위를 고려하여 저수지 운영률에 근거하여 방류량을 결정하고 운영한다. 특히 가뭄 발생 시에는 목표 방

류량을 유지할 수 없으므로, 방류량을 감소시키고 저류량을 증가시키는 저수지 운영을 할 필요가 있다.

용담댐 유역의 가뭄 예·경보를 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다. 첫째, 용담지점의 1969년 1월부터 1994년 12월까지 26년 동안 각 월의 유입량 자료를 사용해 유량을 정규화하였다. 둘째, 정규화된 유량을 이용하여 RPDSI를 산정하였다. 셋째, 각월의 초과확률 75%, 90%, 95% 값을 이용하여 가뭄주의(Drought Watch), 가뭄위험(Drought Warning), 가뭄비상(Drought Emergency)으로 정의하였다.

표 1에 용담 지점에서의 월별 RPDSI값을 제시하였다. RPDSI 값의 75%는 가뭄주의, 90%는 가뭄위험, 95%는 가뭄비상을 나타내며, 음의 값이 크다는 것은 그만큼 가뭄이 심하다는 것을 의미한다. 그림 1과 그림 2에 지면 관계상 용담지점에서 3월과 11월의 초과확률과 가뭄주의, 가뭄위험, 가뭄비상의 관계를 제시하였다.

가뭄 예·경보는 장기 예·경보와 중기 예·경보로 구분하여 시행할 수 있다. 본 글에서 가뭄 장기 예·경보란 3개월 후의 가뭄 상태를 예측하는 것이고, 가뭄 중기 예·경보란 1개월 후의 가뭄 상태를 예측하는 것으로 정의한다.

용담댐 유역에서 가뭄이 예보될 때 합리적 저수지 운영방안을 찾기 위해 표준저수지운영기법(SOP)를

사용하였다. 1969년 1월의 초기 저류량을 용담댐 만수 시 저류량인 상시만수위에 해당하는 저류량으로 가정하고, 운영기간은 월간운영을 사용하였고, 단위는 MCM을 사용하였다. 사용한 연속방정식의 형태는 다음과 같다.

$$S_{t+1} = S_t + I_t - O_t - D_t - SP_t \quad (4)$$

$S_{t+1}$ 은 다음 달의 저류량,  $S_t$ 는 그 달의 저류량,  $I_t$ 는 그 달의 유입량,  $O_t$ 는 그 달의 방류량,  $D_t$ 는 도수량을 의미하며, 전주권으로 매달  $15.67\text{m}^3/\text{s}$ 를 보낸다. 그리고  $SP_t$ 는 초기 저류량으로 잡은 상시만수위에 해당하는 저류량을 초과할 경우 추가 방류하는 여수로 방류량이다. 상시만수위를 최고수위로 저수위를 최저수위로 제한하였다. 따라서 최고수위는 EL.263.5m로 하였고, 저수위는 EL.228.5m로 하였다. 최고수위를 초과할 경우 여수로 방류를 늘리며 6월 21일부터 9월 20까지의 홍수기에는 홍수조절용량을 확보하기 위하여 설정된 수위로써 홍수조절을 행하는데 수위를 이보다 상승시켜서는 안 되며, 용담댐의 홍수기 제한수위는 EL.261.5m이다. 제한수위를 설정하는 이유는 최대 방류량을 초과할 경우에는 여수로 방류를 하기 위함이다. 최저수위보다 작은 경우에는 용담댐 용수공급은 월 평균 전주권으로 항상  $15.67\text{m}^3/\text{s}$ 를 상시 방류

표 1. 용담 지점의 월별 RPDSI값

월 \ 가뭄상태	주의(75%)	위험(90%)	비상(95%)
1월	-0.90	-1.48	-2.02
2월	-1.22	-1.77	-1.85
3월	-0.71	-1.50	-1.88
4월	-0.85	-1.38	-2.25
5월	-1.08	-1.63	-2.72
6월	-1.16	-1.63	-2.06
7월	-0.99	-1.78	-1.98
8월	-1.08	-1.80	-1.91
9월	-1.01	-1.97	-2.22
10월	-0.97	-2.11	-2.49
11월	-1.20	-1.85	-2.59
12월	-0.88	-1.71	-3.03

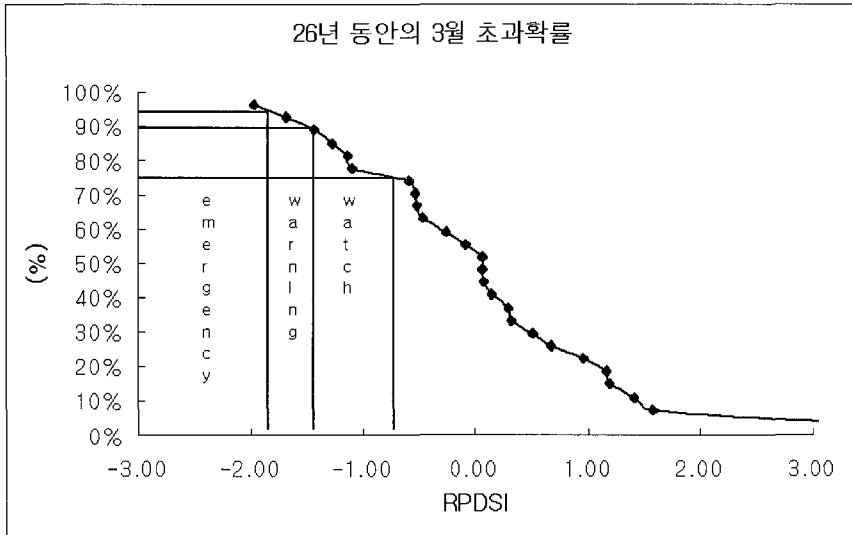


그림 1. 용담지점 3월의 초과확률

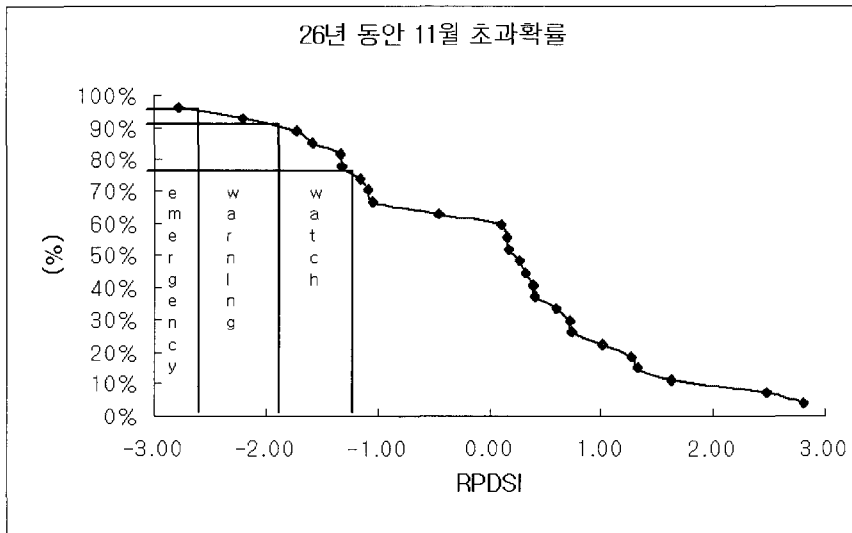


그림 2. 용담지점 11월의 초과확률

하도록 계획되어 있으므로, 첫 번째로 방류량을 감소시키고, 다음으로 도수량을 감소시키도록 운영하였다.

가뭄 예·경보 시스템에 의해 예보된 가뭄상태에 따라 저수지 운영률에 의해 결정된 방류량에 가뭄계수를 곱하여 방류량을 감소시키고 저류량을 증가시켜 가뭄에 대비한 저수지 운영을 실시하였다. 여기서, 가뭄계수는 가뭄 발생 시 가뭄의 상태에 의해 방류량을 조절하기 위하여 방류량에 곱하는 계수이다. 가뭄 예

·경보 시스템에 의한 효율적인 저수지 운영이 이루어지기 위해서는 3개월 후의 가뭄을 예보하는 장기 가뭄예보가 적합할 것이다. 또한 1개월마다 가뭄상태의 변화에 따라 저수지 운영을 수정하는 것이 바람직할 것이다. 본 연구에서는 가뭄 예·경보 시스템에 의한 저수지 운영의 적합성을 검증하기 위해서 기존댐 영역의 과거 기상자료 및 유량자료를 사용하여 가뭄 상태를 결정하고, 이에 따라 저수지 운영을 실시하였다.

용담 다목적댐에서 기본적으로 다음의 세 가지 운영조건을 만족해야 한다고 가정하였다. 첫째, 용담댐에서 각 월의 저류량은 저수위에 해당하는 저류량인 70MCM을 유지해야 하고, 둘째, 하류의 용수공급, 하천유지 등을 위해 계획된 방류량만큼을 방류해야 하며, 셋째, 매월 전주권으로 15.67m<sup>3</sup>/s의 도수량을 공급해야 한다.

가뭄상태에 따라 가뭄계수를 변화시키면서 용담댐의 운영 조건을 가장 적절히 만족시키는 가뭄계수를

찾기 위하여, 표 2와 같이 7개의 대안을 설정하여 가뭄예보 상태에 따라 다양한 가뭄계수들을 고려하였다. 이 대안들을 평가하기 위해 신뢰도, 위험도, 복원도, 취약도를 각각 산정하여 비교하였다.(표 3, 그림 3)

#### 4. 결론

본 글에서는 가뭄 예·경보 시스템을 사용하여 기존

표 2. 각 대안에 대한 가뭄계수

가뭄 예보상태 \ 대안	대안 1	대안 2	대안 3	대안 4	대안 5	대안 6	대안 7
가뭄주의	1.0	0.95	0.95	0.95	0.9	0.9	0.9
가뭄경보	1.0	0.9	0.85	0.8	0.85	0.8	0.75
가뭄비상	1.0	0.85	0.75	0.65	0.8	0.7	0.5

표 3. 각 대안별 신뢰도, 위험도, 복원도, 취약도

대안 \ 평가지표	신뢰도	위험도	복원도	취약도(MCM)
대안 1	0.942	0.058	0.167	48.1
대안 2	0.949	0.051	0.125	48.1
대안 3	0.939	0.061	0.211	48.1
대안 4	0.929	0.071	0.382	47.1
대안 5	0.949	0.051	0.188	48.1
대안 6	0.936	0.064	0.3	47.1
대안 7	0.926	0.074	0.261	47.1

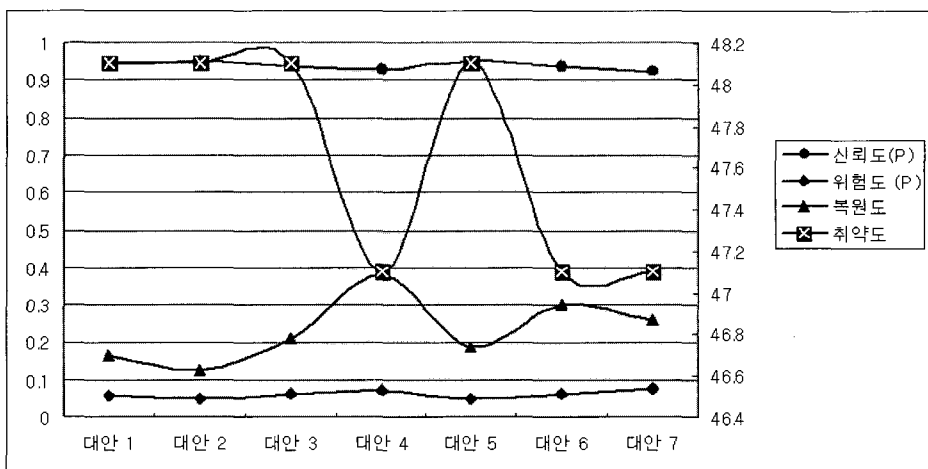


그림 3. 각 대안별 신뢰도, 위험도, 복원도, 취약도

저수지 운영률과 가뭄계수를 사용한 저수지 운영을 수행한 결과를 비교하여 다음과 같이 효율적인 저수지 운영방안을 모색하였다.

첫째, 가뭄 예·경보 시스템을 이용한 저수지 운영을 수행하여 용담지점의 1969년 1월부터 1994년 12월까지 26년 동안의 가뭄상태를 평가하였다.

둘째, 가뭄 예·경보 시스템과 가뭄계수를 사용한 저수지 운영을 저수지 운영률을 사용한 저수지 운영과 비교한 결과, 가뭄 예·경보 시스템과 가뭄계수를 사용한 저수지 운영이 기존의 저수지 운영률을 사용한 저수지 운영에 비하여 평가지표인 신뢰도, 위험도, 복원도, 취약도 등이 모두 향상됨을 확인할 수 있었다.

결론적으로 가뭄 예·경보 시스템과 가뭄계수를 사용한 저수지 운영은, 중·장기 가뭄이 예측될 시 포괄적이고 장기적인 저수지 운영 지침을 제공하여 효율

적 저수지 운영이 가능할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 기상연구소 (1993). "우리나라 가뭄에 관한 연구: 강수량 변동에 기후학적 특성연구." MR93A-005.
2. 김현영 (1995). "우리나라 가뭄의 정의와 특성분석." 대한토목학회지, 제43 권, 제5호, pp. 23~32.
3. 김현준 (1995). "1994-1995 가뭄현지조사." 제 36회 수공학 연구발표회 논문집, pp. 548~553.
4. 조홍제 (1996). "도시지역 용수관리를 위한 가뭄 예·경보 지수에 관한 연구." 한국수자원학회지 논문집.
5. 최영진 (1994). "한국의 기후자료를 이용한 Palmer 가뭄지수와 습윤이상 지수의 비교 분석." 제 36회 수공학 연구발표회 논문집, pp. 233~239.