

저수지 용량결정과 용수공급능력평가를 위한 가뭄빈도공식의 적용 (An Application of Drought Frequency Formula for the Determination of Reservoir Capacity and the Evaluation of Water Supply Capability)

윤용남* ○박민규** 이동률***

1. 서론

가뭄은 짧게는 한 계절에서 1년, 길게는 십여년까지 지속되는 등 시간규모가 다양하며, 그 시작과 끝을 명확하게 정의하기 힘들고, 지속적으로 누적된 효과가 천천히 나타나기 때문에 가뭄이 한창 진행된 뒤에야 가뭄을 인식하게 되어 그 피해가 커지는 경향이 있다. 이러한 문제에 적절히 대처하기 위해 필요한 것은 정확한 가뭄의 원인분석과 가뭄심도의 해석이다. 그리고 이러한 해석을 위하여 무엇보다도 선행되어야 할 것은 객관적이고 널리 적용될 수 있는 가뭄의 정의와 적절한 분석방법일 것이다.

본 연구의 목적은 '런 이론(theory of run)'에 따라 빈도개념의 가뭄심도를 추정하는 것이다. 수자원 개발 계획에서 저수지 이수용량 결정이나 용수공급 능력평가를 위해서는 빈도개념의 가뭄심도 즉, 용수수요량에 대한 공급량의 부족분을 추정하는 것이 중요하며, 여기서는 소양강댐, 충주댐, 대청댐, 안동댐, 섬진강댐의 5개 다목적댐의 유입량자료를 이용하여 가뭄심도를 산정하기로 한다.

2. 가뭄빈도공식의 도입

2.1 런 이론(Run theory)

Yevjevich(1967)는 가뭄사상(drought event)을 다른 사상들과 구분하기 위한 절단수준(threshold level)과 그에 따라 결정되는 런(run)을 사용하는 가뭄을 분석하는 방법을 제안하였다. 가뭄을 그림 1과 같이 시계열에서 판단할 수 있는 물부족의 상태로 볼 때 가뭄현상에 대하여 보다 정확한 정보를 얻을 수 있도록 다음과 같은 런의 요소들을 정의할 수 있다.

(a) 가뭄시작점 : $T_i(1)$, $T_i(2)$ 그리고 $T_i(3)$

(b) 가뭄종료점 : $T_f(1)$, $T_f(2)$ 그리고 $T_f(3)$

(c) 가뭄기간 : L_1 , L_2 그리고 L_3

(d) 가뭄크기 또는 가뭄심도 : S_1 , S_2 그리고 S_3

(e) 가뭄강도 : $I_1 = S_1/L_1$, $I_2 = S_2/L_2$ 그리고 $I_3 = S_3/L_3$

* 고려대학교 토목환경공학과 교수

** 대영엔지니어링 기술연구소 연구원

*** 한국건설기술연구원 선임연구원

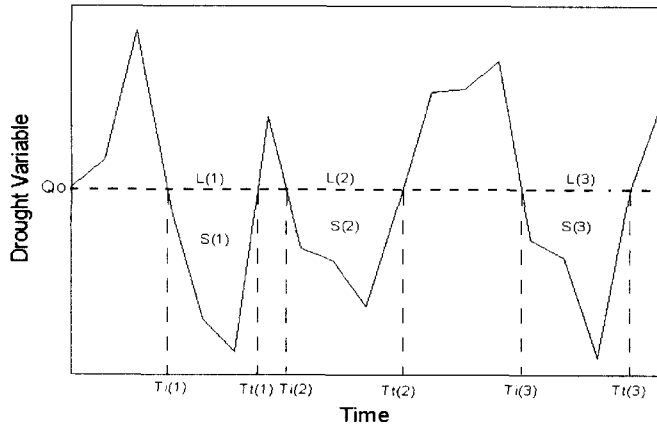


그림 1 가뭄특성을 설명하는 그림

2.2 가뭄빈도공식의 필요성

Chow(1951)는 식 (1)과 같은 홍수빈도공식을 제안하였다.

$$Q_T = Q_m + K_T \sigma_Q \quad (1)$$

여기서 Q_T 는 재현기간 T 년에 대한 연최대홍수량, Q_m 과 σ_m 는 연최대홍수량계열 Q_i 의 평균과 표준편차 그리고 K_T 는 재현기간 T 년과 계열 Q_i 의 확률분포형에 따라 산정되는 빈도계수이다. 홍수빈도공식은 간단하지만 치수구조물의 설계에 필수적인 홍수량 빈도분석의 유용한 도구이다. 그리고 이러한 홍수빈도공식에 병행하여 이수시설물을 설계할 경우 갈수량의 빈도분석이 필요하지만 이 경우 홍수와는 달리 지속기간을 고려하여야 하므로 그 분석이 간단하지 않으며 다년간 가뭄(multiyear drought)을 분석대상으로 하는 경우 일반적인 빈도분석 절차를 적용할 수 없다는 어려움이 있다.

Millan과 Yevjevich(1971)는 다년간 지속되는 가뭄에 빈도개념을 부여할 수 있는 다음과 같은 절차를 소개하였다.

- ① 먼저 추계학적 모형을 구성한다.
- ② 다음으로 추정하려는 빈도에 따라 특정기간의 자료를 일정 회수 이상 모의발생시킨다.(예를 들어 50년빈도 가뭄심도를 추정하려면 50년 기간의 자료를 적어도 500~1000회 이상 모의발생하여야 한다)
- ③ 이후 모의발생한 각각의 자료계열(trace)에 린 이론을 적용하여 최대가뭄을 얻는다.
- ④ 마지막으로 이들 최대가뭄들의 평균을 구하여 이를 특정 빈도의 가뭄심도로 정의한다.

그러나 이 방법은 그 적용의 어려움뿐만 아니라 자료 발생기법의 타당성과 발생된 자료의 통계적 유의성 확보가 선행되어야 신뢰할 수 있는 결과를 도출할 수 있다는 한계점을 가지고 있어 좀 더 간단하고 객관적인 방법이 요청된다.

2.3 가뭄빈도공식의 적용절차

가뭄빈도공식의 적용절차는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 연유출량 계열(물수지연도를 기준)을 작성한다.
- 2) 평균(x_m), 표준편차(σ_x), 변동계수(c_r), 왜곡도계수(c_s)와 계열상관계수(ρ)를 계산한다.
- 3) 적합도 검정(χ^2 -test와 K-S test 등)을 통하여 최적분포형(정규분포, 2변수 대수정규분포, 2변수 gamma 분포)을 선정한다.
- 4) 확률분포형에 따라서 절단수준(x_m)과 가뭄발생확률 $q(= P(x_i < x_m))$ 을 계산한다.

i) 정규분포 : $q=0.5, z_m=0.5$ (2)

ii) 2변수 대수정규분포 : $q = P(z_i < z_{mi}), z_{mi} = 0.5[\ln(1 + c_r^2)]^{0.5}$ (3)

iii) 2변수 gamma 분포 : $q = P(z_i < z_{mg}), z_{mg} = 0.333c_r$ (4)

여기서 z_m, z_{mi}, z_{mg} 는 표준정규분포형으로 환산된 각 분포형의 절단수준을 말한다.

- 5) 평균재현기간이 T 년인 최대가뭄기간의 기대값 $E(L_T)$ 를 계산한다.

- i) 조건부 확률 r 을 수치적분을 이용하여 계산한다.

$$r = q + \frac{1}{2\pi q} \int_0^{\rho} \left[e^{\frac{-0.5z_i^2}{1+\tau^2}} \right] \cdot (1-\tau^2)^{-0.5} d\tau \tag{5}$$

위 식에서 절단수준 z_0 에는 분포형에 따라 z_m, z_{mg}, z_{mi} 를 쓴다.

계열상관계수 ρ 에는 정규분포나 gamma분포일 경우 2)에서 산정된 값을 쓴다.

대수정규분포일 경우 $\rho_i = \frac{\ln[\rho \cdot c_r^2 + 1]}{\ln(1 + c_r^2)}$ 을 사용한다. τ 는 적분변수이다.

- ii) 평균재현기간이 T 년인 최대가뭄기간의 길이(j)에는 1년 ~ T 년까지의 T 가지 경우의 수가 있다고 보고 각 경우의 발생확률을 식 (6)을 이용하여 계산한다.

$$p(L_T=j) = e^{-\pi(1-j)r^{2j}} [e^{(\pi(1-j)^2 r^{2j})} - 1] \tag{6}$$

- iii) 평균재현기간이 T 년인 최대가뭄기간의 기대값 $E(L_T)$ 를 식 (7)을 이용 계산한다.

$$E(L_T) = \sum_{j=1}^{\infty} j \cdot p(L_T=j) \tag{7}$$

- 6) 최대가뭄의 가뭄강도 I 의 기대치는 식 (8)을 이용하여 계산한다.

$$I = -\frac{e^{\left(\frac{-z_0^2}{2}\right)}}{q\sqrt{2\pi}} - z_0 \tag{8}$$

여기서 절단수준 z_0 에는 분포형에 따라 z_m, z_{mi}, z_{mg} 를 쓴다.

- 7) 평균재현기간 T 년의 가뭄빈도계수를 계산한다.

$$F_T = [I \times E(L_T) - c_v^{-1}] \tag{9}$$

- 8) 평균재현기간 T 년의 최대가뭄의 심도를 계산한다

$$S_T = x_m + F_T \times \sigma_x \tag{10}$$

3. 가뭄빈도공식을 이용한 저수지 용량 결정과 용수공급능력 평가

3.1 저수지 용량의 결정(Rippl 방법)

Rippl의 방법에 확률개념을 도입하여 저수용량-공급수량-재현기간의 관계를 수립하는 연구는 종종 소개되어 왔지만 이들 대부분의 연구는 장기간 유량자료를 합성하기 위한 몇가지 추계학적 모의발생기법을 비교 검토하는데 주로 초점을 두어 왔으며 적용하기가 복잡하고 어려운 문제점을 보이고 있다. 본 연구에서 소개하는 가뭄빈도공식은 적용과정이 간단하고 비교적 받아들일 수 있는 범위의 결과를 주므로 예비설계단계에서 사용될 수 있는 장점이 있다. 또한 Rippl 방법에서 채용하고 있는 개념이 가뭄빈도공식에서 기초하고 있는 런 이론과 단순히 누가계열이냐 아니냐 외에는 차이가 없는 동일한 해석결과를 주는 모형이므로 여기서는 가뭄빈도공식의 적용결과를 기존의 Rippl 방법에 의한 결과에 빈도의 개념을 부여한 발전된 방법으로 제시한다.

여기서는 대수정규분포에 대하여 대표적인 소양강댐과 충주댐에 대하여 정리하였다. 소요저수용량-공급수량-재현기간(Storage -Draft-Return Period) 관계를 수립하여 도식화하면 그림 1과 같다.

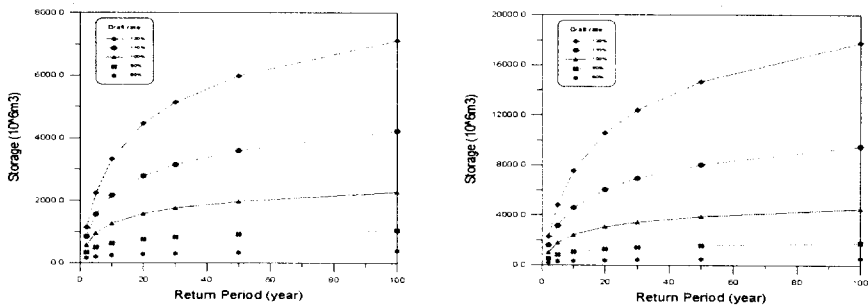


그림 1. 소요저수용량-공급수량-재현기간 관계곡선(소양강댐과 충주댐)

3.2 용수공급능력 평가지표 산정을 위한 가뭄빈도공식 이용

신뢰도 기준에 따른 저수지의 용수공급능력 평가는 공급계획 또는 약정 의무에 따라 결정되는 일정기준에 대한 물부족 상태의 발생에 주된 관심이 주어진다. 따라서 이러한 용수공급에서의 물부족상태란 다음의 세 가지 관점에서 검토되어야 한다. (1) 얼마나 자주 용수부족이 발생하는가 (2) 용수부족이 발생한 이후 얼마나 빨리 정상상태로 회복되는가 그리고 (3) 용수부족의 결과는 얼마나 심각할 것인가. (1)은 신뢰성(reliability)에 관한 것으로 전체 기간 중 물부족을 경험하는 기간의 비, 즉 절단수준에 따른 가뭄발생확률로 표현될 수 있으며 (2)는 복원성(resiliency)에 관한 것으로 최대가뭄의 기간으로 정의할 수 있고 (3)은 취약성(vulnerability)을 말하며 총수요량에 대한 물부족량의 크기로 정의할 수 있다. 용수공급능력의 평가에서 이러한 지표들에 대한 객관적인 계산방법을 정립할 수 있다면, 다양한 신뢰도 수준에 따른 합리적 용수공급계획의 수립이 가능할 것이다.

신뢰도 지표를 정의하기 위하여 절단수준에 따른 가뭄발생확률을 이용하였다. 즉, 가뭄발생확률을 용수공급의 위험도로 정의하고 신뢰도 지수를 (1-가뭄발생확률)로 계산하였다. 복원도 지표를 위해서는 가뭄빈도공

식으로 추정된 100년 빈도 가뭄의 기간, 즉 최대용수부족기간을 이용하였다. 복원도 지수는 (1/최대용수부족기간)으로 계산이 가능하며 이 값은 용수부족 사태가 발생할 때 그 문제가 다음 해까지 이월되지 않고 해결될 확률을 보여준다. 따라서 이러한 복원도 지수가 1보다 큰 경우는 거의 연내의 강수량으로 해결될 수 있는 수준의 용수부족현상이라고 볼 수 있다. 취약도 지표를 산정하기 위해서는 가뭄빈도공식으로 추정된 100년 빈도 가뭄의 심도, 즉 최대용수부족량을 이용한다. 일반적으로 취약도 지수는 ((수요량-공급량)/수요량)으로 정의되므로 여기서는 연간 수요량과 공급량을 고려하기 위하여 (최대용수부족량/최대용수부족기간)을 연간용수수요량으로 나누어 계산하였다. 이러한 분석결과는 표 1~표 2에 정리하였다.

표 1. 소양강댐의 용수공급능력평가 (100년 빈도 기준)

	용수수요량					
	20% 증가	10% 증가	장기간 평균	10% 감소	20% 감소	
인출율(m ³ /sec)	80.27	73.58	66.89	60.20	53.52	
연간 용수수요량(10 ⁶ m ³)	2531.4	2320.4	2109.4	1898.5	1687.8	
신뢰도	가뭄발생확률	0.748	0.670	0.576	0.466	0.347
	신뢰도지수	0.252	0.330	0.424	0.534	0.653
복원도	최대부족기간(year)	7.797	5.158	3.120	1.641	0.693
	복원도지수	0.13	0.19	0.32	0.61	1.44
취약도	최대부족량(10 ⁶ m ³)	7129.0	4223.8	2269.9	1052.1	387.9
	취약도지수	0.361	0.353	0.345	0.338	0.331

표 2. 충주댐의 용수공급능력평가 (100년 빈도 기준)

	용수수요량					
	20%증가	10%증가	장기간 평균	10%감소	20%감소	
인출율(m ³ /sec)	185.85	170.36	154.87	139.38	123.90	
연간 용수수요량(10 ⁶ m ³)	5861.0	5372.5	4884.0	4395.5	3907.3	
신뢰도	가뭄발생확률	0.776	0.680	0.559	0.420	0.276
	신뢰도지수	0.224	0.320	0.441	0.580	0.724
복원도	최대부족기간(year)	10.401	6.400	3.545	1.669	0.605
	복원도지수(1/기간)	0.10	0.16	0.28	0.60	1.65
취약도	최대부족량(10 ⁶ m ³)	17792.3	9508.5	4529.3	1818.2	557.6
	취약도지수	0.291	0.276	0.262	0.248	0.236

4. 결론

본 연구에서는 연유량계열에 대하여 해석적인 방법으로 빈도개념의 런(run)을 추정할 수 있는 가뭄빈도공식의 적용방법을 고찰하였다. 이와같은 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 순간적인 최대량만을 고려하면 되는 홍수와는 달리 가뭄에서는 무강우일수 등의 가뭄발생요인들이 얼마나 계속될 것인가를 파악하는 것도 중요하다. 즉, 지속기간에도 빈도의 개념을 도입할 필요가 있다. 그러나 기존의 방법처럼 지속기간 별로 갈수량계열을 작성하고 각 계열을 빈도분석하여 지속기간-재현기간-

갈수량 관계를 얻을 경우 지속기간이 재현기간에 독립이라고 가정되므로 특정빈도의 가뭄이 얼마나 계속 될 것이냐 등의 가뭄기간에 대한 문제에는 적합하지 못하게 된다. 따라서 만약 가뭄기간에 평균재현기간의 개념을 포함시킨 문제를 다룬다면 기존의 방법보다는 런 이론(theory of run)을 이용하는 것이 분석목적에 타당할 것이다.

- 2) 기존의 연구에서 연유량자료로부터 추출된 런(다년간 가뭄)에 빈도개념을 부여하기 위해서는 주로 모의 발생을 이용하였으나 이 경우 그 절차가 번거롭고 적용상의 어려움이 많은 단점이 있었다. 가뭄빈도공식은 해석적으로 빈도개념의 런을 계산할 수 있는 빈도계수법의 형태를 가지는 추정방법으로 그 계산절차가 간단하고 객관적이며 분석결과 역시 타당한 범위내에 있기 때문에 이러한 문제점에 대한 해결책이 될 수 있다고 판단된다.
- 3) 소양강댐, 충주댐, 안동댐, 대청댐, 섬진강댐의 건설 이후 유입량 자료를 대상으로 가뭄빈도공식을 적용하고 이를 댐의 예비설계단계에서 이용할 수 있는 보다 합리적인 저수지 이수용량의 결정방법으로 제시하였다. 이러한 방법은 과거자료에 대한 런의 분석결과가 Rippl 방법에 의한 결과와 동일한 값을 준다는 사실을 고려한다면 이 방법의 이론적 약점으로 언급되어온 자료계열의 추계학적 성격을 설명하지 못한다는 한계점을 해결했다고 볼 수 있으며 그 분석결과로 설계목적에 유용한 저수용량-공급수량-재현기간의 관계에 관한 갈수빈도곡선을 작성할 수 있었다.
- 4) 가뭄빈도공식의 적용결과에는 가뭄심도의 크기 뿐만 아니라 그 지속기간과 재현기간의 개념이 포함되어 있기 때문에 어떤 규모를 가지는 저수지의 용수공급능력을 평가하는 수단으로 이용할 수 있다. 본 연구에서는 용수공급능력의 신뢰성을 평가하기 위한 목적으로 신뢰도, 복원도, 취약도의 지표를 정의하고 산정하였다. 이때 신뢰도 지표로는 절단수준에 따른 가뭄발생확률을, 복원도 지표로는 최대가뭄의 기간을 그리고 취약도의 지표로는 최대가뭄의 심도를 사용하였다. 이러한 결과는 기존에는 저수지 운영분석을 통해서만 가능했던 신뢰성 평가를 비교적 간단하게 구할 수 있도록 해결했다고 판단된다.
- 5) 이상의 연구결과에서 가뭄빈도공식을 이용한 가뭄심도의 분석은 수자원 계획에서 보다 합리적인 용수수급계획을 수립하는데 유용할 것으로 판단된다.