

물리적인 방법에 의한 설계갈수량 추정

이재형¹⁾ ○윤재민²⁾ 이희주³⁾

1. 서론

우리나라는 아직 설계수문량에 대한 기준이 체계적으로 정비되어 있지 않다. 특히 갈수량의 경우는 하천이 정상적인 기능을 유지하기 위한 최소유량을 결정하는 필수적인 요소이나, 갈수 빈도 해석에 필요한 갈수 유출자료가 부족하며 그 신뢰성도 떨어지므로 이러한 자료로는 빈도해석 결과의 정확성을 기대할 수 없다. 이러한 문제점 때문에 현업에서는 단순 면적비율법이나 평균유출고법 등에 의하여 수문량을 추정하고 있으나, 갈수는 유역특성이나 지형 및 지질학적인 특성에 따라 크게 변하기 때문에 그러한 방법들은 현실성이 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 유역의 수문, 지질, 기후특성 등을 반영된 설계갈수량을 추정하기 위해 빈도해석 대신에 물리적인 방법을 사용하여 실용적인 설계갈수량 추정 방법을 제안하고자 한다.

2. 설계갈수모형

가뭄기간과 기본 갈수량은 무작위변수이며 상사인 확률사상이다. 이러한 전제를 적용하면 재현기간을 감수지속시간으로 변환 할 수 있고 이에 상응하는 갈수량을 추정 할 수 있다.

2.1 무침투기간의 확률모형

가뭄기간의 연시계열은 EV1분포로 나타낼 수 있다. EV1분포는 주로 한계값이 없는 자료로서 분포의 꼬리 모양이 지수함수형으로 감소하는 모양을 가진 자료 분포에 많이 이용된다. 가뭄기간의 경우도 그 상한값을 알 수 없으므로 그 분포의 최 상단 꼬리에서 경계를 지을 수 없다. 또한 EV1분포는 최 하단 꼬리에서도 경계가 없으므로 무침투기간의 지속기간이 음의 값이 될 수 없기 때문에 분포의 이론적인 결점이다(Gottschalk 등, 1997). 그러나 본 연구는 EV1분포의 최 상단 꼬리에 속하는 값들을 이용하므로 EV1분포를 무침투기간에 대한 확률모형으로 적용할 수 있다. 수문년 동안에 가뭄기간을 τ 라 하면, 확률변수 τ 의 EV1분포는 식(1)과 같이 표현된다.

$$F_{\tau}(t_D) = \exp[-\exp(-(t_D - u)/\alpha)] \quad -\infty < t_D < \infty; \quad \alpha > 0 \quad (1)$$

1) 전북대학교 사회기반시스템공학과 교수
2) 전북대학교 토목공학과 박사수료
3) 전북대학교 토목공학과 박사과정

여기서 a 는 축척 매개변수이고, u 는 위치 매개변수로서 최대확률의 발생위치를 표시한다. 이 매개변수들은 가뭄기간에 대한 통계분석을 통해 추정되며, 일반적으로 안정하고 균등한 공간분포를 가지는 것으로 알려져 있다(Perzyna, 1994). 추정된 매개변수 값들은 설계갈수모형에 대한 기후입력자료로 사용된다.

2.2 갈수유출 모형

갈수유출모형으로 유동방정식에 의한 감수모형을 선택했다. 이 모형은 비피압대수층으로부터 하천으로의 유출을 설명하는 유로-대수층 모형이 그 근간을 형성한다(조기태, 1999). 지금까지 제시되어왔던 다양한 유로-대수층 모형들은 식(2)으로 대변된다. 이 식은 유역의 복잡하고 다양한 유출특성을 초기유량과 감쇄상수를 이용하여 지수방정식 형태로 표현한 것으로 일반적으로 계측지점에 적용된다.

$$Q_t = Q_0 e^{-t/k} \quad t \geq 0; Q_0 \geq 0 \quad (2)$$

여기서 t 는 무침루기 개시로부터 경과시간, t_D 는 가능 최대 무침루기간, Q_0 는 시간 $t=0$ 에서 초기유량, Q_t 는 시간 t 에서 하천유출량, 그리고 k 는 유량의 감쇄율을 나타내는 상수로서 $e^{-1/k} = K$ 의 관계를 가지며 K 는 감수상수이다.

식(2)은 유역의 유출특성을 나타낼 수 있는 유역특성변수를 사용하면 식(3)과 같이 표현할 수도 있다. 식(3)은 많은 수문학자들이 갈수량을 추정하기 위한 지역 수문 모형을 개발하기 위하여 시도한 지역 수문 회귀모형을 기초로 한 것으로 유역면적, 평균 유역경사, 감수상수, 그리고 유역 내의 저수지 유역면적이 차지하는 비율 등을 이용하여 지수함수형으로 표현한 것이다. 이러한 회귀모형의 장점은 미계측지점에 적용이 가능하다는 것이다. 국내에 적용된 사례로는 조기태(1999)가 미계측지점에서 설계갈수량 추정식을 개발하는데 이용하였으며, 이재형(2001) 등은 지역 주지하수 감수곡선 모형 개발을 위해 회귀모형을 이용하였다.

$$Q_t = b_0 A^{b_1} S^{b_2} (1-L)^{b_3} K^{b_4(t)} \quad (3)$$

여기서 Q_t 는 측정지점의 갈수량, A , S , K 는 각각 측정지점의 유역면적, 유역경사, 감수상수이며, $b_0, b_1, b_2, b_4(t)$ 는 회귀상수이다. L 은 유역 내에서 저수지 유역면적이 차지하는 비율을 나타내는 것으로 유역 내의 저수지 유역면적을 유역면적으로 나눈 값이다.

2.3 감수시간 모형

갈수지속기간 사상과 무침루기간 사상은 상사사상이므로 식(2)로부터 무침루기간 t_D 에 상응하는 기본갈수량은 $Q_{t_D} = Q_0 \exp(-t_D/k)$ 이 된다. 초기유량 Q_0 와 감쇄상수 k , 그리고 가뭄기간 τ 을 확률변수로 간주하면 무침루기간 말 최소갈수량 Q_τ 은 Q_0 , k 그리고 τ 의 함수가 된다. 확률변수들 중 Q_0 와 k 을 평균값과 같이 상수로 취급하면 Q_τ 는 τ 만의 함수가 된다. 따라서 τ 의 극대치 분포함수와 Q_τ 의 극소치 분포함수 사이에는 식(4)과 같은 관계가 성립된다(Gottschalk과 Perzyna, 1989).

$$F_{Q_\tau}(Q_{t_D}) = 1 - F_\tau(t_D) \quad (4)$$

여기서 $Q_{t_D} = Q_0 \exp(-t_D/k)$ 을 t_D 에 관해 정리하여 식(1)에 대입하고 $F_\tau(t_D)$ 을 식(4)에 대입하면 다음과 같은 갈수량 분포함수를 유도할 수 있다.

$$F_{Q_i}(Q_{t_D}) = 1 - \exp\left\{-\left[Q_{t_D} \frac{\exp(u/k)}{Q_0}\right]^{\frac{k}{\alpha}}\right\} \quad 0 \leq Q_{t_D} \leq \infty \quad (5)$$

식(5)의 분포는 순간갈수량에 적용한다. 어떤 특정기간 t_D^* 일에 대한 평균갈수량을 구하기 위해서는 $Q_{t_D} = Q_0 \exp(-t_D/k)$ 을 t_D^* 에 관하여 평균한 식(6)을 적용한다.

$$Q_{t_D} = \frac{Q_0 k [\exp(t_D^*/k) - 1]}{t_D^*} \exp(-t_D/k) \quad (6)$$

누가확률분포함수 식(5)은 갈수량의 경우에는 초과확률이 되므로 식(7)과 같은 관계가 된다.

$$F_{Q_i}(Q_{t_D}) = 1/T \quad (7)$$

식(5)의 우변을 식(7)의 좌변에 대입하고 무침루기간 t_D 에 관해 풀면 식(8a)과 같이 재현기간과 무침루기간의 관계를 설정할 수 있다.

$$t_D = u - \alpha \ln\left[\ln \frac{T}{T-1}\right] \quad (8a)$$

또한 식(3)을 적용하면 미계측지점의 T 과 t_D 의 관계도 결정할 수 있다. 이재형 등(2001)은 식(3)의 $b_4(t)$ 가 $\delta + t$ 임을 밝혔다. 따라서 감수상수를 제외한 나머지 부분을 $\overline{Q_0}$ 로 놓으면 $Q_{t_D} = \overline{Q_0} K^{(\delta + t_D)}$ 이 되며 이 식을 식(5)에 대입하여 상기의 과정을 반복하면 식(8b)과 같은 관계를 설정할 수 있다.

$$t_D = u_r - \alpha \ln\left[\ln \frac{T}{T-1}\right] \quad u_r = u - \delta + \ln\left(\frac{\overline{Q_0}}{Q_0}\right)^k \quad (8b)$$

위의 무침루기간과 재현기간의 관계는 기후인자인 α , u 에 의하여 조정됨을 알 수 있다. 설계기준인 재현기간이 정해지면 이에 상응하는 무침루기간은 지역의 기후조건과 이중 자연대수 함수관계에 의하여 결정되고 식(2), 식(3), 그리고 식(6)에 의해서 설계갈수량을 구할 수 있다. 이때에 초기유량과 감수상수에 의해서 지하 저류지의 유출특성이 반영된다.

3. 적용

본 연구에서 적용된 대상유역은 금강수계내의 용담수위표 지점을 출구로 하는 유역이며, 유역내 10여개의 미계측 지점을 선정하여 갈수량을 측정하고, 그 자료를 활용하였다.

3.1 갈수 빈도해석

갈수 빈도해석을 위해 매년 1월 1일부터 12월 31일까지를 수문년으로 하는 1963년부터 1987년까지 25년간의 용담수위표 지점의 유출량자료를 이용하였다. 본 지점의 유출량자료는 자기수위기록계에 의한 오류와 홍수기록 누락에 의한 수위자료의 보정이 이루어진 것이다(건설부, 1991).

갈수 빈도해석 방법으로 도시위치방법을 사용했다. 사용된 자료는 15일 지속기간의 연최소유량 계열이다. 자료에 대한 확률도시를 위해 매년의 유출량자료로부터 15일 지속기간의 평균유량을 계산하고 이를 순차 정렬하여 제일 작은 값을 그 해의 15일 지속기간의 최소유량 Q_{15} 로 정한다. 생성된 Q_{15} 를 Gringorten 도시공식을 사용하여 도시하였다. 재현기간을 횡축, Q_{15} 를 종축으로 하여 빈도해석결과를 반대수지 상에 나타냈다(그림 1). 빈도해석 결과는 빈도별 갈수량의 참값이 되며 본 물리모형의 실용성을 입증하기 위한 기준이 된다.

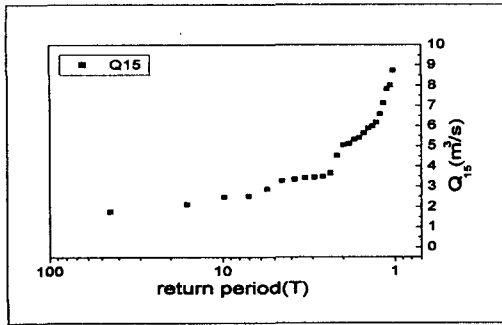


그림 1 빈도해석 결과

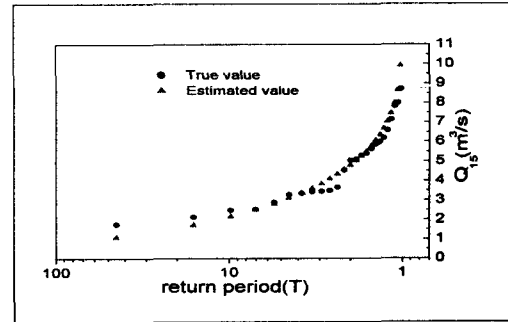


그림 2 참값과 추정치의 비교

3.2 갈수유출 모형 평가

2.2절에서 유동방정식에 의한 감수모형 식(2)과 회귀모형 식(3)을 갈수유출 모형으로 채택했다. 식(2)을 평가하는데 필요한 감수 특성치를 식(2)에 대입하면 하나의 곡선식이 작성되며 이 곡선식은 측정지점의 주지하수 감수곡선이 된다. 그림 3은 용담수위표 지점과 주자천의 주지하수 감수곡선을 나타낸 것이다.

회귀모형인 식(3)은 초기유량을 종속변수로 하고 유역면적, 평균유역경사, (1-L), 감수상수 등을 독립변수로 하여 다중회귀분석을 실시함으로써 평가된다. 식(3)의 경우는 종속변수와 독립변수 사이가 비선형이므로 양변에 대수값을 취하여 선형화하여 다중회귀분석을 실시하였다. 분석결과는 다음 표1에 게재하였다. 모형 I 은 갈수량과 시간 관계에 의해 산정된 감수상수 값 0.91을 적용한 것이고, 모형 II는 통계적인 방법에 의해 산정된 감수상수 값 0.96을 적용한 것이다. 각 모형의 결정계수는 모형 I 이 0.934, 모형 II가 0.935로 평가되었다.

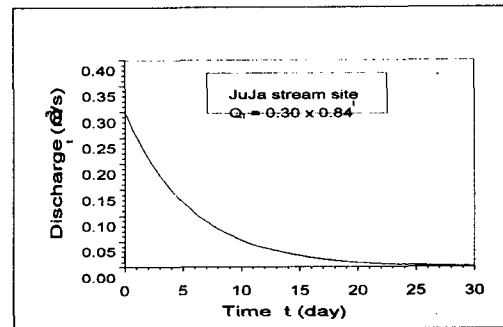
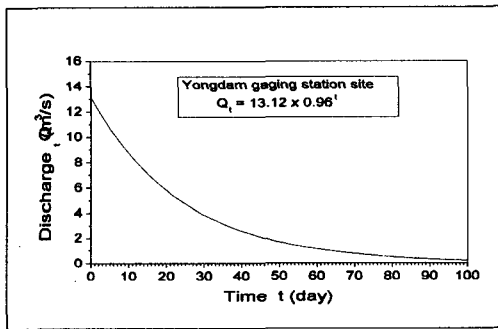


그림 3 주지하수 감수곡선

표 1 다중회귀분석 결과

모형		b_0	b_1	b_2	b_3	$\delta + t$	결정계수
AS(1-L)K	I	0.00469	1.25461	1.63026	-0.49856	-0.48363	0.934
	II	0.00445	1.2332	1.56998	-0.52807	-1.21053	0.935

3.3 감수시간 모형 평가

2.3절에서 재현기간과 무침루기간의 관계 식(8)을 결정하였다. 이 감수시간 모형은 식(8a)과 식(8b)으로 분류된다. 전자는 계측지점에 적용되는 식이고, 후자는 미계측지점에 적용되는 식이다. 계측지점인 용담수위표 지점은 티센망 도(圖)에서 용담 우량관측소에 속한다. 따라서 용담 우량관

측소의 문턱값 2mm에 해당하는 변수 값으로 $\alpha=10.32$, $u=28.47$ 을 식(8a)에 대입하고 재현기간에 상응하는 무침루기간을 결정하였다. 미계측지점의 경우도 측정지점별로 해당 변수 값(표 2)을 산정하여 식(8b)에 대입하고 재현기간에 상응하는 무침루기간을 결정하였다. 그림 4는 용담수위표지점과 내오천 지점에 적용한 결과를 나타낸 것이다. 결정된 무침루기간을 식(2), 식(3), 그리고 식(6)에 대입하면 설계갈수량을 추정할 수 있다. 본 물리모형의 실용성을 증명하기 위해서 결정된 무침루기간을 지속기간 평균갈수량 추정 식(6)에 대입하고 그 추정값을 3.1절의 빈도해석결과의 참값과 비교하였다. 그 결과 표준추정오차는 0.434로 평가되어 추정치의 정확도는 높다고 할 수 있다. 또한 그림 4에서 참값과 추정치가 비교적 잘 일치하고 있음을 정성적으로 판단 할 수 있다.

표 2 측정지점의 변수 값

변수	내오천	장계천	계북천	양악천	구량천	주자천	내동천	신지천	유천	정자천
u_r	29.37	25.14	29.90	26.77	28.49	29.00	31.60	24.14	23.70	30.49
α	11.50	8.74	11.50	10.32	10.32	10.32	11.50	10.32	8.74	11.50

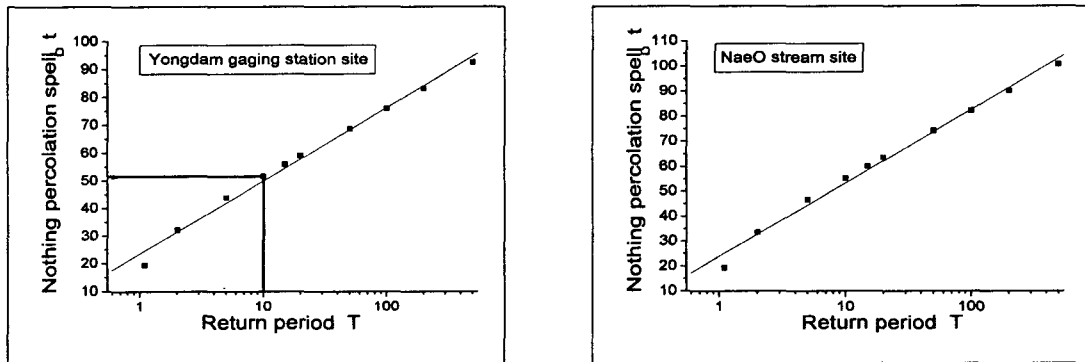


그림 4 재현기간과 무침루기간의 관계

4. 결론

현업에서 사용하고 있는 갈수 빈도해석의 대안으로 사용 가능한 설계갈수량을 추정할 수 있는 방법을 제시하였다. 즉, 가뭄기간과 갈수지속시간의 확률구조가 상사라는 전제하에 재현기간을 갈수지속시간으로 변환할 수 있는 감수시간 모형 식(8)을 제시하였으며, 이에 상응하는 갈수량을 추정하여 실제 유출량 자료를 이용한 빈도별 갈수량의 참값과 비교하여 그 실용성을 입증했다.

5. 참고문헌

- 건설부(1991). 용담다목적댐 건설사업 기본계획서. p.82-87.
- 안상진, 윤용남, 강관원(1981). 금강수계의 하천형태학적 특성인자에 의한 갈수량 산정. 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회. 14(1), p.31-37
- 윤용남(1979). 출력-출력모형에 의한 갈수량 빈도곡선의 합성. 대한토목학회논문집, 대한토목학회. 27(2), p.89-94.
- 이재형 등(2002). 수리-통계 모형에 의한 갈수 빈도 분석
- 이희주(2002). 쌍치유역의 기저유출 특성분석. 석사학위논문, 전북대

- 조기태(1999). 미계측 산지하천 유역의 설계갈수량 추정식 개발. 박사학위논문, 전북대.
- 한국수문학회(1995). 하천시설기준(조사편).
- 황규성(2001). 용담수위표 지점의 갈수량 빈도해석을 위한 수문-통계모형. 석사학위논문, 전북대.
- 홍민(2002). 용담유역의 갈수 지역빈도분석. 석사학위논문, 전북대.
- Gottschalk, L., Perzyna, G.(1989). A physically based distribution function for lowflow. *Hydrol. Sci. J.*, 34(5), p.559-573.
- Gottschalk, L., Tallaksen, L. M., and Perzyna, G.(1997). Derivation of lowflow distribution functions using recession curves. *J. Hydrol.*, 194, p.239-262.
- Jae-Hyoung L., Nam-Sun O., and HeeJu L.(2001). A study on the development of regional master recession curve model. *J. KoSSGE*, 6(3), p.61-71.
- Smakhtin, V. U.(2001). Low flow hydrology: a review. *J. Hydrol.*, 240, p.147-186.
- Strahler, J. R.(1950). Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis. *Am. J. Sci.*, 248, p.673-696.
- Tallaksen, L. M.(1995). A review of baseflow recession analysis. *J. Hydrol.*, 165, p.349-370.