장기지속가뭄 수문시나리오에 의한 한강수계 수자원 평가

Water Resources Assessment based on the Hydrologic Scenarios of the Sustained Drought in Han River

이광만*, 강신욱**
Gwang Man Lee, Shin Uk Kang

요 지

우리나라에서 장기지속가뭄의 사례는 문헌을 통하여 쉽게 찾아볼 수 있는데 "증보문헌비고"에 따르면 조선시대에는 100건 이상의 가뭄이 발생하였는데 평균 5년에 한번정도 발생한 것으로 나타났다. 이중 2년연속가뭄이 15회, 3년연속가뭄이 4회, 4년연속가뭄이 1회 및 6년연속가뭄이 2회 기록되어 있다. 그러나 역사적 고증이 어려워 실제 가뭄사례는 더 심했을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 장기지속가뭄에 대한 평가를 통하여 안정적 용수공급의 수준을 평가하고 용수공급부족 심도를 추정하기 위하여 한강수계를 대상으로 장기지속가뭄 수문시나리오를 개발하여 용수공급에 기여하고 있는 저수지 시스템에 적용하였다. 이중 장기지속가뭄 수문시나리오는 한강수계를 팔당댐 상류에 대해 5개 소유역으로 구분하여 1,000년의 월 유량자료를 모의하여 30, 60, 90개월의 지속기간에 대해 50, 100 및 200년빈도에 대하여 개발하였다. 개발된 장기지속가뭄 수문시나리오에 대한 수자원평가는 화천, 소양, 충주, 충주조정지 및 팔당댐을 소유역과 수자원 시설물 구성요소로 하는 시스템을 만들어 팔당댐 기준 2011, 2016 및 2020년의 용수수요에 대하여 평가하였다. 평가모형은 동적계획기법을 이용하였으며, 월 단위 운영을 실시하였다. 평가결과는 지속기간이 짧을수록 재현빈도가 길수록 용수공급측면에서 가뭄강도가 심한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 장기지속가뭄, 수자원 평가

1. 서론

우리나라에서 장기지속가뭄의 사례는 문헌을 통하여 쉽게 찾아볼 수 있는데 "증보문헌비고"에 따르면 조선시대에는 100건 이상의 가뭄이 발생하였는데 평균 5년에 한번정도 발생한 것으로 나타났다. 이중 2년연속가뭄이 15회, 3년연속가뭄이 4회, 4년연속가뭄이 1회 및 6년연속가뭄이 2회 기록되어 있다. 그러나 당시의 수문사상을 역사적으로 고증이 어려워 실제 가뭄사례는 더 심했을 것으로 판단된다. 이와 같이 가뭄해석의 어려움은 지속기간과 크기인데 사례에 대한 정보가 부족한 것이 일반적이다. 이를 극복하기 위한 방법중 하나는 합성유량자료 계열을 이용하는 것이다 (Yevjevich, 1975). 즉 과거 관측 자료의 추계학적 특성에 의거하여 수문시나리오를 개발하는 것으로, 방법론은 추계학적 시계열 모형을 이용하여 분석에 필요한 다양한 수문사상이 포함될 수 있도록 희망하는 수문계열을 인위적으로 생성하는 것이다. 실제, Tarboten (1995)은 이와 같은 개념을 이용하여 미국 주요 하천의 장기 가뭄에 따른 수자원 평가를 위하여 연 단위의 합성유량을 만들어 적용한 예가 있다. Wijayaratne과 Golub(1991)는 미국 New Jersey의 Pequest강 유역을 대상으로 연 합성유량 계열을 만들어 장기 가뭄해석에 이용했으며, Arena 등(2005)은 기대치 아래에서 일정량의 용수공급을 유지하기 위한 모의를 시계열 분석 기법을 이용하여 다 지점의 장기 가뭄 빈도해석을 하였다. Burn등(2004)은 재구성된 합성자료로부터 하천유량 가뭄정보를 통합하는 법을 개발하여 캐나다의 Athabasca강에 적용하고 극치 가뭄의 심각성을 평가한바 있다. 국내에서는 고석구 등(1992)이 충주저수지 시스템의 운영율 개발을

* 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원·E-mail : lkm@kwater.or.kr
** 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원·E-mail : sukang@kwater.or.kr

위하여 합성유량을 이용한 예가 있다.

본 연구에서는 장기지속가뭄에 대한 평가를 통하여 안정적 용수공급의 수준을 평가하고 용수공급부족 심도를 추정하기 위하여 한강수계를 대상으로 장기지속가뭄 수문시나리오를 개발하고 저수지 시스템에 적용하였다. 이중 장기지속가뭄 수문시나리오는 한강수계를 팔당댐 상류에 대해 5개 소유역으로 구분하여 1,000년의 월 유량자료를 모의하여 30, 60, 90개월의 지속기간에 대해 50, 100 및 200년빈도에 대해 개발하였다. 장기지속가뭄 수문시나리오에 대한 수자원평가는 화천, 소양, 충주, 충주조정지 및 팔당댐을 시스템으로 구성하여 팔당댐 기준 2011, 2016 및 2020년의 용수수요에 대하여 평가하였다. 평가모형은 동적계획기법을 이용하였으며, 월단위 운영을 실시하였다. 평가결과는 지속기간이 짧을수록 재현빈도가 길수록 용수공급측면에서 가뭄강도가 심한 것으로 나타났다.

2. 장기 가뭄 수문시나리오 개발

한강 수계 장기지속가뭄 수문시나리오를 개발하기 위해 과거 수문기록자료의 통계적 특성을 이용하는 추계학적 수문시계열 모형을 적용하여 합성 수문계열을 모의하는 것으로 다음과 같은 절차를 적용하였으며, 이를 도식화하면 Fig 1과 같다. 우선 한강수계를 대상으로 화천댐, 소양강댐, 충주댐, 중주조절지댐 및 팔당댐을 하류지점으로 하는 5개 소유역에 대한 과거 월 유량자료를 조사한다. 이어 조사된 5개 소유역 월 유량자료에 대한 통계분석을 실시하고, 팔당댐 기준(소유역 유량을 모두 합한 값)의 전유역의 월 유량자료를 대상으로 지속기간별, 빈도별 유량을 가뭄분포모형을 이용하여 추정한다.

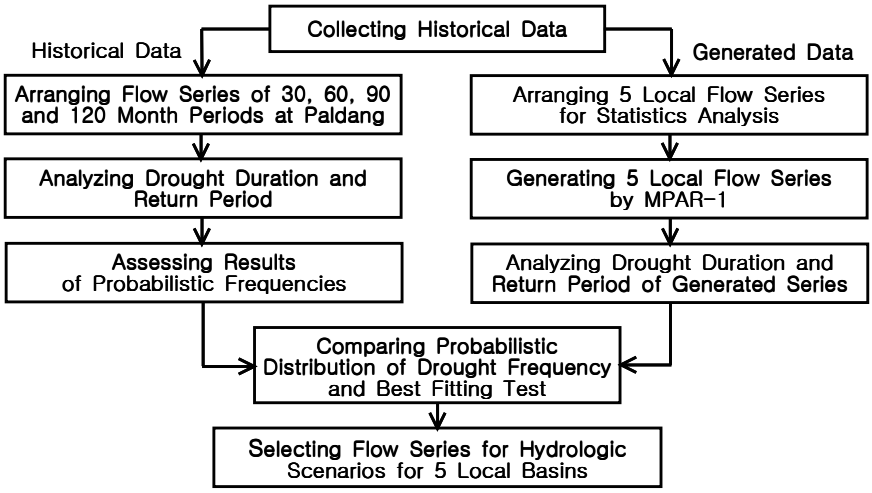

Fig. 1. The Procedure of Developing Sustained Drought Hydrologic Scenarios

다음으로 5개 소유역의 월 유량자료를 이용하여 추계학적 수문모형을 이용하여 5개 소유역에 대한 월 단위 합성유량을 모의하며, 모의된 월 기간 합성유량을 대상으로 팔당댐 기준(소유역 유량을 모두 합한 값) 전체 유량을 대상으로 지속기간별, 빈도별 가뭄빈도를 해석한다. 마지막으로 과거 유량자료 계열의 지속기간별, 빈도별 가뭄유량과 합성유량의 지속기간별, 빈도별 가뭄유량을 비교하여 합치여부를 판단한 후 지속기간별, 빈도별 수문시나리오를 합성유량계열에서 선택한다.

3. 장기 가뭄 수문시나리오에 의한 한강수계 수자원 평가

3.1 평가 시스템 구성 및 모형 개발

관측 유량자료 계열이 짧은 경우를 대상으로 장기지속가뭄의 영향을 평가하기 위해서는 가뭄수문시나리오의 개발이 효과적이다. 특히 재현기간 100년 이상의 빈도해석을 위해서는 상당기간의 자료가 축척되어 있어야 하며 자료 취득기간에 걸쳐 인위적 영향을 거의 받지 않아야 한다. 한강수계에서 수도권 지역의 용수공급에 영향을 주는 다목적댐으로 충주댐와 소양강댐이 있으며, 발전목적으로 분류되고 있으나 용수공급 기여도가 높은 화천댐과 그리고 춘천, 의암, 청평 및 팔당 등 수력발전용댐이 있다. 다른 다목적댐에 비하여 용수공급 능력이 낮은 중규모 댐으로 횡성댐이 운영되고 있다. 이들 댐에서 저류된 후 방류된 유량은 팔당댐에 모여서 수도권의 각처로 공급된다. 본 연구에서는 이와 같은 특징을 고려하여 한강유역의 장기가뭄에 대한 수자원 공급체계를 평가하기 위하여 Fig 2와 같이 수자원시설물을 기준으로 상류의 충주댐, 소양강댐 그리고 화천댐 등 3개 대규모 댐과 충주댐 하류의 조절지댐(달천유입), 그리고 이들 하류 유역인 팔당댐 유역 등 5개 소유역으로 구분하였다. 장기 가뭄 수문시나리오 개발에 필요한 과거 수문자료 역시 이들 5개 소유역을 대상으로 월 유량자료로 정리하였다.

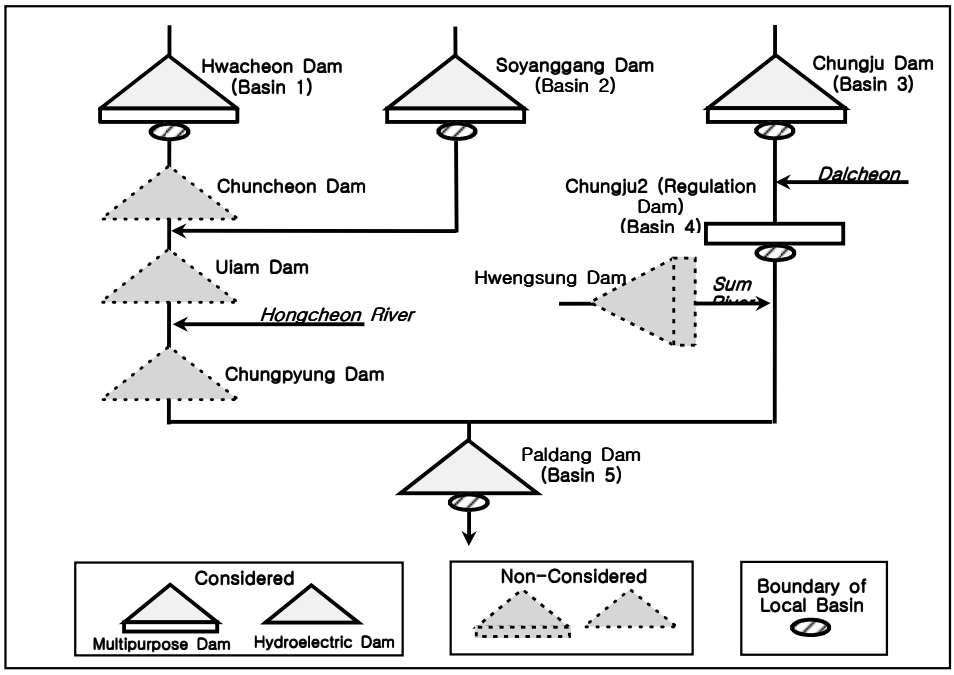

Fig. 2. Demarcating 5 Local Basins According to Dams in Han River

그림 Fig.2의 물 수지 분석 체계를 분석하기 위한 방정식은 다음과 같이 정의 할 수 있다. 우선 팔당댐 지점을 기준으로 팔당댐 지점 노드(node)로의 유입량과 방류량을 구분하면 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\sum (flow)_p - \sum (outflow)_p = 0 \quad (1)$$

여기서 $(flow)_p$는 팔당지점을 기준으로 한강수계에서 유립량으로 간주되는 인자의 총합을 의미하고 $(outflow)_p$는 팔당지점을 기준으로 한강수계에서 방류량으로 간주되는 인자의 총합을 의미한다. 단, 팔당댐 내에 저류는 발생하지 않으며 유입량은 모두 방류된다고 가정한다. 한편, $(flow)_p$와 $(outflow)_p$는 다시 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$(flow)_p = H_r + S_r + C_r + L_i \quad (2)$$

$$(outflow)_p = P_r + P_p + L_u \quad (3)$$

이중 (L_u)는 상류댐과 팔당댐 사이에서 국지 유입량(L_i)의 이용수량 중 순물 소모량에 해당하는 부분으로 순물 소모량 계수를 α라하면 다음과 같다.

$$L_u = \alpha L_i \tag{4}$$

한편 충주 및 소양강댐 연계운영을 평가하기 위한 모형은 DP를 이용하였으며, 목적함수와 과련 제약조건은 다음과 같다.

$$Max \sum_{t=1}^{N} WS_p,\ t = 1, ..., N \tag{5}$$

subject to;

$$WS_p = S_r + C_r - H_r - (L_i - L_u) - U_1 - U_b \tag{6}$$

$$X_{t+1,1} = X_{t,1} + I_{t,1} - S_r - E_{t,1}(X_{t,1}, X_{t+1,1}) - D_{t,1},\ \text{for}\, t = 1, ..., T \tag{7}$$

$$X_{t+1,2} = X_{t,2} + I_{t,2} - C_r - E_{t,2}(X_{t,2}, X_{t+1,2}) - D_{t,2},\ \text{for}\, t = 1, ..., T \tag{8}$$

$$X_{t,k\min} \le X_{t,k} \le X_{t,k\max},\ \text{for}\, t = 1, ..., T \tag{9}$$

$$U_{t,k\min} \le U_{t,k} \le U_{t,k\max},\ \text{for}\, t = 1, ..., T \tag{10}$$

3.2 적용결과

장기지속가뭄 수문시나리오에 대한 수자원평가는 화천, 소양, 충주, 충주조정지 및 팔당댐을 요소로 하는 시스템에 2011년, 2016년, 2020년 기준수요량을 적용하였다. 각 소유역에 대한 공급량은 2절에서 생성된 지속기간별 빈도별 유출량이다. 평가모형은 동적계획기법을 이용하였으며, 월단위 운영을 실시하였다. 구성한 시스템을 평가하기 위한 목적함수는 팔당댐에서의 용수부족을 최소화하는 목적함수를 사용하였고, 화천댐, 소양강댐, 충주댐의 초기해(initial trajectory)는 과거 운영실적을 참고하여 월별 평균값으로 설정하였다. 이와 같은 설정을 통하여 한강유역의 장기 가뭄 시나리오에 의해 용수 부족량을 계산하였다. 지속기간별 빈도에 따른 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Estimated Water Shortages According to Drought Periods and Frequencies

구 분		50년 빈도(10^6㎥)	100년 빈도(10^6㎥)	200년 빈도(10^6㎥)
2011년 기준수요 기준	30개월	347.6	454.6	668.7
	60개월	263.0	344.1	443.1
	90개월	231.2	294.8	371.1
2016년 기준수요 기준	30개월	335.7	440.3	658.1
	60개월	248.2	319.9	433.3
	90개월	210.6	275.7	347.7
2020년 기준수요 기준	30개월	331.5	435.1	650.0
	60개월	229.6	312.3	410.5
	90개월	200.4	266.1	337.2

2011년 기준수요량에 따른 팔당댐 지점의 50년 빈도 90개월 지속기간의 용수부족량은 약 231백만㎥이며, 이와 같은 가뭄이 재현된다면 해마다 약 31백만㎥의 용수부족이 생기는 것으로 계산되었다. 용수부족량이 가장 큰 시나리오는 200년 빈도 30개월 지속기간의 경우이며, 약 669백만㎥의 용수부족이 발생하였으며, 이를 1년단위로 환산하면 267백만㎥의 용수부족이 발생하는 것이다. 2016년 기준수요량에 대해 가장 적은 용수부족량의 시나리오는 50년 빈도 90개월 지속기간의 경우였으며, 이 때 부족량은 211백만㎥이었다. 가장 큰 용수부족량이 발생한 시나리오는 200년 빈도 30개월 지속 시나리오였고, 부족량은 658백만㎥이었다. 2020년 기준수요량에 대해서 역시 용수부족량의 크기만 다를뿐 같은 빈도 및 지속기간의 시나리오였다. 2011년, 2016

년, 2020년 기준수요량에 의한 용수부족량 평가결과, 지속기간이 짧을수록 재현빈도가 길수록 용수공급측면에서 가뭄강도가 심한 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구는 장기가뭄수문시나리오에 근거한 한강수계 다목적 댐의 용수공급능력을 평가하였다. 분석결과는 가뭄기간이 장기화됨에 따라 용수공급 부족량이 감소하고 있는데 이는 댐의 저류능력과 Carryover효과에 따른 것이다. 실제 가뭄의 위험성은 2~3년 정도의 기간에 집중되는 것으로 용수공급을 위한 수자원시설물의 운영에 더욱 어려운 상황이 예상된다. 따라서 장기가뭄을 고려한 수자원공급계획은 이와 같은 특징을 고려하여야 하며 50년 빈도이상에서는 큰 부족량이 발생하므로 이에 대한 대책이 요구된다.

참 고 문 헌

고석구, 이광만, 고익환 (1992). “다기준 의사결정기법에 의한 다목적 저수지의 운영율 평가,” **한국수문학회 논문집**, 제25권 제1호, pp.75-82.

Arena, C., Cannarzozzo, M., Mazzola, M.R. (2005) "Multi-year drought frequency analysis at multiple sites by operation hydrology: a comparison.", Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, 08561.

Beran, M., Rodier, J.A. (1985). "Hydrological aspects of drought, Studies and reports in Hydrology.", 39, *UNESCO-WMO,* Paris, France

Tarboten D. G. (1995). “Hydrologic Scenarios for Severe Sustained Drought in the Southwestern United States.”, *Water Resources Bulletin*. 31(5):803-14.

Wijayaratne, L.H., Golub, E. (1991). "Multilayer drought simulation." Water Resources Bulletin, *American Water Resources Association*, 27(3), pp.387-395.

Yevjevich, V. (1975). “Generation of hydrologic samples, Case study of the Great Lakes.”, *Hydrology paper* 72, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.