

비정상성 가정에 따른 설계홍수량 및 재현기간 변화에 관한 연구

A study on the change of design flood and return period estimates under a non-stationary condition

신홍준*, 김태순**

Hongjoon Shin, Taesoon Kim

요 지

충청북도 괴산군에 위치한 괴산댐은 비록 규모는 작으나 순수 국내기술진에 의하여 설계, 시공된 최초의 발전용 댐이다. 한편, 2017년 7월 중순 괴산댐 상류에 발생한 집중호우로 인해 괴산댐 유입량이 급격하게 증가한 바 있으며 이로 인해 수위 증가에 따른 수문 방류가 이루어졌으나, 급격한 방류로 인해 하류부 피해가 발생한 바 있다. 해당 시기에 발생한 강우사상은 500년 빈도 이상의 매우 이례적인 현상으로 유입량의 비정상적인 증가는 현 괴산댐의 수문방류능력으로는 대응하기 어려웠을 것으로 판단된다. 건설된 지 60년에 달하는 괴산댐의 건설 당시 설계홍수량은 현재 기후변화로 인한 강우 및 그로 인한 유입량의 증가를 대응하기에는 부족하다고 판단되며 증가된 확률홍수량과 그에 따라 줄어든 재현기간을 재산정할 필요가 있다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 비정상성 가정에 따른 재현기간 산정방법인 기대 대기시간과 기대 초과사상수 정의를 이용하여 괴산댐 유역의 확률홍수량을 재산정하고, 기존 방법과 비정상성을 고려한 방법 간의 비교를 통해 재현기간과 확률홍수량의 변화를 살펴보고자 한다.

핵심용어 : 기후변화, 재현기간, 기대 대기시간 정의, 기대 초과사상수 정의

1. 서론

충청북도 괴산군 칠성면에 위치한 괴산댐은 1957년 상업발전을 시작한 총 저수량 15.3백만 m³의 콘크리트 중력식 댐으로 비록 규모는 작으나 순수 국내기술진에 의하여 조사, 계획되고 설계, 시공된 최초의 발전용 댐이다. 한편, 2017년 7월 16일 집중호우로 인해 괴산댐 유입량이 급격한 증가한 바 있으며, 이로 인해 수위 증가로 인한 수문 방류를 개시하였으나, 급격한 방류로 인해 하류부 피해가 심각하였다. 해당 시기에 발생한 강우사상은 매우 이례적인 현상으로, 집중호우로 인한 유입량의 비정상적인 증가는 괴산댐의 방류능력으로는 대응하기 힘들었을 것으로 판단된다. 건설된 지 60년에 달하는 괴산댐 건설 당시 설계홍수량은 현재 기후변화로 인한 강우 및 유입량의 증가를 대응하기에는 부족하다고 판단되며 증가된 강우만큼 늘어난 홍수량을 재산정할 필요가 있다. 한편 수공구조물의 설계 및 안정성과 관련하여 기후변화에 따른 비정상성을 고려한 연구가 많이 진행되고 있다. 빈도해석 분야로 한정하면 매개변수 내의 비정상성 고려방법에 관한 연구, 비정상성을 고려할 수 있는 적절한 확률분포형에 연구, 비정상성을 고려할 때의 재현기간 또는 비초과확률 산정방법 등의 연구가 진행되고 있다. 매개변수 내의 비정상성 고려방법에 관한 연구 및 적절 분포형에 대한 연구는 1990년대 말부터 논의가 진행되었으며 주로 매개변수에 경향성을 반영하는 연구가 많이 수행된 바 있다(Coles, 2001; Katz et al., 2002; Kwon et al., 2009; Kwon and Lee, 2011). 최근에는 시간의 흐름에 따라 수문학적 특징이 변화한다는 가정하여 초과확률과 비초과확률이 변하게 되는 재현기간의 변화에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다 (Wigley, 1988, 2009; Olsen et al., 1998; Parey et

* 정회원 · 한국수력원자력(주) 중앙연구원 수력기술그룹 선임연구원 · E-mail : h.j.shin@khnp.co.kr

** 정회원 · 한국수력원자력(주) 수력처 수력운영팀 차장 · E-mail : aquarisleo@khnp.co.kr

al., 2007, 2010). 그 중 하나는 다음 초과 사상 때까지 기대 시간이 T년이라는 기대 대기시간 정의이고, 다른 하나는 T년 내에 초과되는 사상의 발생횟수의 기댓값이 1이라는 기대 초과사상수 정의이다. 본 연구에서는 비정상성을 고려하여 피산댐 유역의 확률홍수량을 재산정하고, 기존의 재현기간 산정방법과 비정상성을 고려한 방법 간 비교를 통해 피산댐 확률홍수량의 변화를 살펴보았다.

2. 모형

2.1 비정상성 가정의 기대 대기시간 정의

비정상성 가정 하에서 임의기간(t)에 처음으로 임의의 사상(z_{q_0})을 초과하는 사상이 발생할 확률은 초과 확률(p_t) 및 비초과확률(q_t)을 이용하여 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다 (Olsen et al., 1998).

$$P(T=t) = P(x_1 \leq z_{q_0}, \dots, x_{t-1} \leq z_{q_0}, x_t > z_{q_0}) = (1-p_1)(1-p_2) \dots (1-p_{t-1})p_t \quad (1)$$

이를 PDF와 CDF로 나타내면 Eqs. (2)~(3)과 같고, 재현기간 (T)에 기댓값을 취하면 Eq. (4)와 같다.

$$f(t) = p_t \prod_{i=1}^{t-1} (1-p_i) \quad (2)$$

$$F(t) = \sum_{i=1}^t f(i) = \sum_{i=1}^t p_i \prod_{j=1}^{i-1} (1-p_j) \quad (3)$$

$$E(T) = \sum_{i=1}^{t_{\max}} t f(t) = \sum_{i=1}^{t_{\max}} t p_i \prod_{j=1}^{i-1} (1-p_j) \quad (4)$$

2.2 비정상성 가정의 기대 초과사상수 정의

초과 사상 발생횟수 변수를 N 이라 하면, 임의의 기간(t) 동안 초과 사상 발생 횟수는 다음과 같다.

$$N = \sum_{t=1}^T I(x_t > z_q) \quad (5)$$

여기서 I 는 임의의 기간 t 에서 대해서 초과 사상의 발생 여부를 나타내는 지수(indicator)이다. 만약, $x_t > z_q$ 이면 $I=1$ 이고 $x_t < z_q$ 이면 $I=0$ 이다. 비정상성 가정 하에서 변수 N 은 더 이상 이항 분포를 따르지 않기 때문에 N 에 대해 기댓값을 취하면 Eq. (6)과 같다 (Parey et al., 2007).

$$E(N) = \sum_{t=1}^T E[I(x_t > z_{q_0})] = \sum_{t=1}^T P(x_t > z_{q_0}) = \sum_{t=1}^T p_t \quad (6)$$

2.3 비정상성 Gumbel 분포

본 연구에서는 극치 자연사상 모의시 널리 이용되는 Gumbel 분포를 이용하였다 (Table 1).

Table 1. Time-varying parameter and CDF of Nonstationary Gumbel distribution

Model	$\epsilon(t)$	$\alpha(t)$	$F(x)$
NSGUM($\epsilon(t), \alpha$)	$\epsilon_0 + \epsilon_1 t$	α	$\exp[-\exp(-\{x - (\epsilon_0 + \epsilon_1 t)\}/\alpha)]$

3. 연구 방법

3.1 유역 현황

피산댐 유역은 유역면적 676.73 km², 형상계수 1.51로 Fig. 1 및 Table 2와 같이 정방형에 가까운 유역형

상을 나타내나 유역 내 하천밀도가 높으며 유역크기에 비해 하천이 상당히 긴 형태의 유역이다. 또한 Fig. 3은 괴산댐 유역의 표고분포를 나타낸 그림으로, 평균표고 EL.359.67m, 유역 내 최고표고 EL.1046.42m에 비해 42.11%의 평균경사는 이 유역이 비교적 경사가 급한 지역으로 이루어져 있음을 의미한다.



Fig. 1 Goesan dam basin map

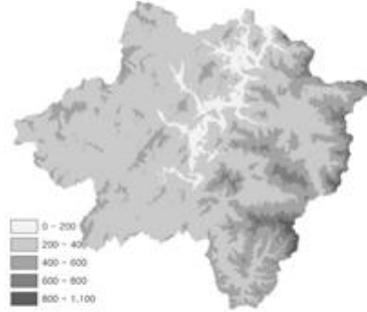


Fig. 2 Elevation map

Table 2. Geographical features in Goesan dam basin

Area(km ²)	Mean EL.(EL.m)	Max. EL.(EL.m)	Mean slope(%)	Basin length(km)	Shape factor
676.73	359.67	1046.42	42.11	78.45	1.51

3.2 연구 방법

본 연구는 먼저 기왕 괴산댐의 유입량 및 강우량 자료를 수집하여 이를 Gumbel 분포를 이용한 정상성 빈도해석과 nonstationary를 가정한 NSGUM 분포 중 위치매개변수의 변동을 가정하는 NSGUM($\epsilon(t), \alpha$)에 적용하여 빈도해석을 수행하였다. 매개변수 추정 후 기존 재현기간 산정방법과 비정상성을 고려한 재현기간 산정방법인 기대 초과사상수 및 기대 대기시간 정의를 이용하여 분석하였다.

4. 연구 결과

4.1 시계열분석

괴산댐의 1982년~2017년의 연최대 유입량 시계열은 Fig. 3과 같다. 연최대 유입량의 평균은 476mm, 표준편차 282mm, 변동계수 0.593, 왜곡도계수 1.237로 양으로 왜곡된 형태이며, 매년 점차 줄어드는 경향이였으나 2017년 예외적으로 많은 양의 유입이 발생하였다.

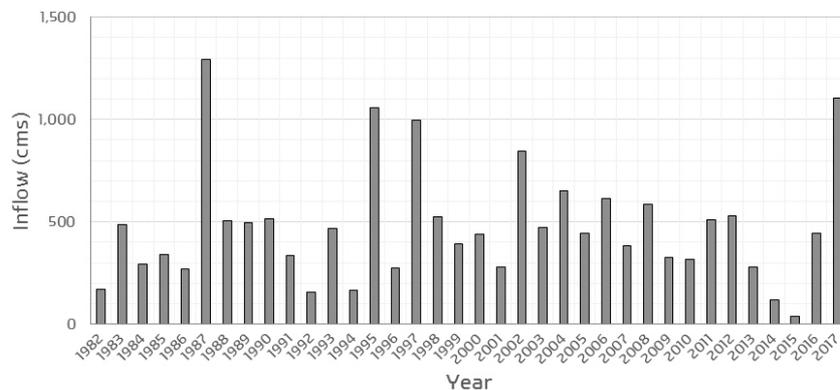


Fig. 3 Inflow time series of Goesan dam

4.2 확률홍수량 추정 및 재현기간 산정방법별 비교

다음 Fig. 4~5는 연최대 유입량 자료를 정상성 Gumbel 모형에 적용했을 때 나타난 PDF 및 CDF 결과이고, Fig. 6은 비정상성 모형에 적용했을 때 정상성 모형과의 quantile을 비교한 그림으로 NSGUM ($\epsilon(t), \alpha$) 모형의 경우 정상성 모형과 비교했을 때 약간 증가하는 정도를 보인다. 다음 Fig. 7은 동일한 크기의 확률홍수량에 대해 정상성 모형과 비정상성 모형에서 산정된 재현기간을 도시한 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 관측자료가 증가경향이 있기 때문에 동일한 크기의 유입량이 정상성 모형에 의해 산정된 재현기간보다 비정상성 모형에 의해 산정된 재현기간이 더 작아지는 것을 볼 수 있다. 특히 비정상성 가정의 기대 대기시간 정의 (WT)에 의한 재현기간이 비정상성 가정의 기대 초과사상수 정의 (NE)에 의한 재현기간 보다 더 작아지는 것을 확인할 수 있다. 특히 기대 초과사상수 정의에 의한 결과는 재현기간이 짧은 경우 재현기간이 오히려 더 커지는 경우도 있으나, 재현기간이 길 경우에는 기대 대기시간 정의와 마찬가지로 재현기간이 더 작아지게 된다.

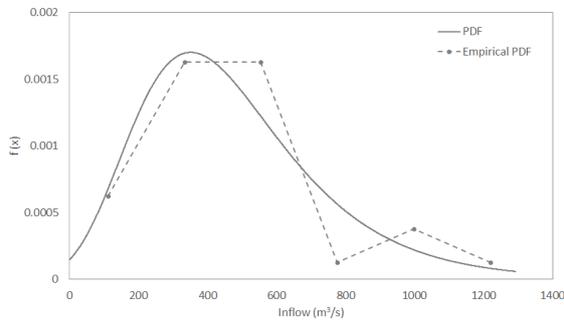


Fig. 4 PDF of stationary Gumbel model

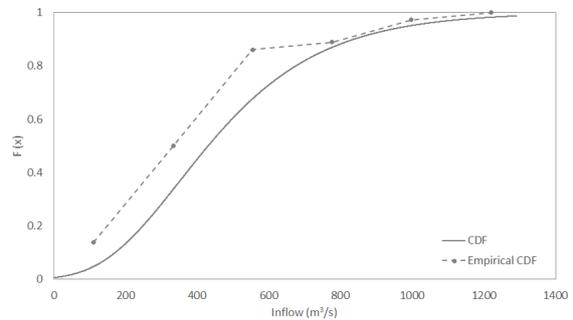


Fig. 5 CDF of stationary Gumbel model

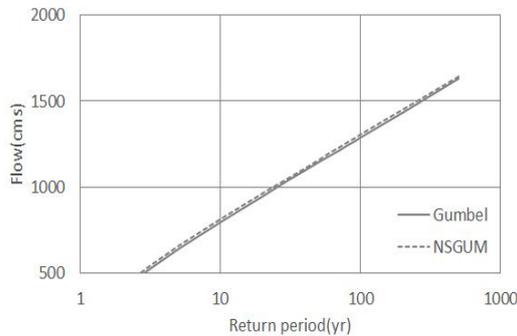


Fig. 6 Comparison of return period for stationary and nonstationary models

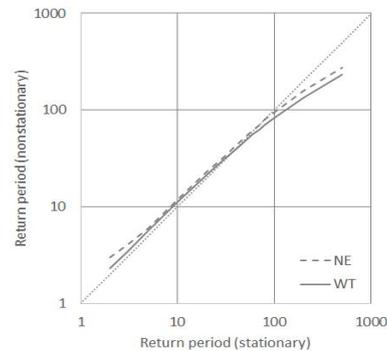


Fig. 7 Quantile estimates of stationary and nonstationary models

5. 결론

본 연구에서는 기후변화에 따라 변화하고 있는 강우현상에 따라 기존 수공구조물의 계획 설계빈도의 변화에 대한 연구를 수행하였다. 기존 정상성 가정의 빈도해석 모형 대신 비정상성 가정의 빈도해석 모형을 사용하였고, 이에 따른 재현기간 산정방법 역시 기대 대기시간 정의와 기대 초과사상수 정의를 이용하여 변화된 재현기간을 산정하였다. 그 결과 기존 정상성 모형으로 산정한 재현기간이 강우사상의 변화 경향에 따라 변화되는 것을 확인할 수 있었으며, 구체적으로 재현기간 100년 미만에서는 정상성 결과와 비슷한 재현기간을 보이나, 재현기간 100년과 200년에서 기대 초과사상수 정의에서는 6%, 21%, 기대 대기시간 정의에서는 17%, 33%의 재현기간 감소가 확인되었다.

참고문헌

1. Coles S. (2001). An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer-Verlag, London.
2. Katz, R.W., Parlange, M.B., and Naveau, P. (2002). "Statistics of extremes in hydrology." Advances in Water Resources, Vol. 25, No. 8-12, pp.1287-1304.
3. Kwon, H.H., Lee, J.J. (2011). "Seasonal Rainfall Outlook of Nakdong River Basin Using Nonstationary Frequency Analysis Model and Climate Information." Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 44, No. 5, pp. 339-350.
4. Kwon, Y.M., Park, J.W., Kim, T.W. (2009). "Estimation of Design Rainfalls Considering an Increasing Trend in Rainfall Data." Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 29, No. 2B, pp. 131-139.
5. Olsen, J.R., Stedinger, J.R., Matalas, N.C., and Stakhiv, F.Z. (1998). "Risk of extreme events under nonstationary conditions." Risk Analysis, Vol. 18, No. 4, pp.497-510.
6. Parey, S., Malek, F., Laurent, C. Dacunha-Castelle, D. (2007). "Trends and climate evolution: Statistical approach for very high temperatures in France." Climatic Change, Vol. 81, No. 3-4, pp.331-352.
7. Parey, S., Hoang, T.T.H., and Dacunha-Castelle, D. (2010). "Different ways to compute temperature return levels in the climate change context." Environmetrics, Vol. 21, pp.698-718.
8. Wigley, T.M.L. (1988). "The effect of climate change on the frequency of absolute extreme events." Climate Monitor, Vol. 17, No. 1-2, pp.44 - 55.
9. Wigley, T.M.L. (2009). "The effect of changing climate on the frequency of absolute extreme events." Climatic Change, Vol. 97, No. 1-2, pp.67 - 76.