

저수지 물공급을 위한 신뢰도 분석에 관한 연구

A Study on the Reliability Analysis for Water Supply on Reservoir System

심 명 필* / 이 봉 희** / 김 경 탁***

Shim, Myung Pil / Lee, Bong Hee / Kim, Kyung Tak

Abstract

Reliability, resiliency and vulnerability for the risk analysis are mathematically defined as the evaluation standard of risk level to characterize the risk which influences water resources management and optimal reservoir operations. Monthly inflows are synthetically generated by stochastic generation model for a long-term reservoir water budget analysis, and this method is applied to the Dae-Cheong Multipurpose Dam. As a result of study, reliability based on occurrence, time and quantity are derived respectively. Also resiliency, vulnerability and resiliency indices are estimated to evaluate the performance of water supply on reservoir system, and their relationships are evaluated.

요 지

본 연구에서는 수자원 관리와 저수지의 최적 운영에 영향을 미치는 위험의 수준을 결정하고 위험의 특징을 규명하기 위하여 위험도 평가시 평가 기준이 될 수 있는 신뢰도, 복원도, 취약도 등의 지표를 수학적으로 정의하였다. 그리고 저수지 시스템의 기능 수행 능력을 평가하기 위해서 추계학적 모의발생기법을 통하여 모의 발생된 월 유입량 자료를 이용하여 대청 다목적댐을 대상으로 저수지 물수지 분석을 실시하였다. 분석 결과를 토대로 저수지 시스템의 기능 수행 능력을 평가하기 위하여 시간, 빈도, 양적 기준 신뢰도 및 복원도, 복원도 지수, 취약도를 산정하였으며, 상호간의 관계에 대하여 검토하였다.

Keywords: risk analysis, reservoir operation, reliability, resiliency, vulnerability

* 인하대학교 토목공학과 교수

** 인하대학교 대학원 토목공학과 석사졸업

*** 인하대학교 대학원 토목공학과 박사과정

1. 서 론

저수지 시스템의 운영 과정이나 신규 수자원 확보를 위한 수자원 공급 계획의 수립에 있어서의 불확실성은 언제나 존재한다. 이러한 불확실성을 계량화하기 위한 방법으로서 불확실한 요소를 어떠한 기대값 또는 가장 극심한 조건의 값을 사용하거나 단기간 동안의 수문자료를 사용하여 확정론적 방법으로 저수지 시스템의 기능수행능력을 평가하여 저수지 시스템의 신뢰도를 결정하는 방법이 널리 사용되어져 왔다. 그러나 신뢰도 수준을 고려하지 않거나 왜곡된 신뢰도를 기준으로 저수지를 운영하는 방법은 저수지 시스템으로부터의 손실이 크게 되어 기대 편익이 과소하게 평가될 수 있어 보다 합리적인 방법들이 요구되고 있다.

불확실성 하에서 저수지 시스템의 기능수행능력에 대한 성과를 측정하는 척도로서 가장 보편적으로 사용되고 있는 신뢰도는 어떠한 일에 대해서 목표를 달성하게 되는 빈도를 가리키며, 위험도는 이와 반대로 목표를 달성하지 못하는 빈도를 나타낸다. 그러나 이러한 신뢰도만으로 저수지 시스템의 기능수행능력 평가시, 용수 부족이 발생하였을 경우 그 결과의 심각성은 나타내지 못한다. 따라서 저수지 시스템의 용수공급을 위한 신뢰도를 분석함에 있어서 시스템 파괴의 정도, 지속기간 및 파괴 발생시 발생하는 부족량의 개념이 고려된 신뢰도 분석 기준의 제시가 필요하다.

저수지 용수공급의 신뢰도 분석 연구로서 Klemes (1969)는 댐의 저수용량을 결정하기 위하여 과거의 유입량 자료를 이용하여 초기 저수용량을 0에서부터 유효 저수용량까지 변화시켜가며 그에 따른 신뢰도 분석을 실시한바 있으며, Klemes 등(1981)과 Votruba와 Broza(1989)는 신뢰도 기준을 빈도(occurrence-based), 시간(time-based), 양적기준(quantity-based) 신뢰도의 세가지 관점을 기준으로 용수공급의 신뢰도에 대한 연구를 수행한 바 있다. 저수지 용수공급의 복원도에 관한 연구로서 Vogel과 Bolognese(1995)는 저수지의 상태가 정상, 파괴 두 형태인 Markov연쇄 모형을 이용하여 시스템 파괴의 평균지속기간, 평균재현기간 및 복원도 지수와의 관계에 대한 연구를 수행한 바 있으며, 저수지의 상태에 따른 복원도 지수의 사용범위를 제안하였다. Hashimoto 등(1982)과 Moy (1986)는 각각 추계학적 동적 프로그래밍 기법과 다목적 mixed-integer 선형계획법(multiobjective mixed-integer linear programming)기법을 이용하여 저수

지의 용수공급에 대한 능력을 신뢰도, 복원도, 취약도의 세가지 관점을 기준으로 평가하고 상호간의 관계에 대한 연구를 수행한 바 있다. 국내의 경우 다목적 저수지의 월별 운영에 있어 신뢰도를 고려한 월별 운영을 개발에 관한 연구(고석구 등, 1991)가 수행되었으며, 댐의 용수공급능력을 평가하기 위한 평가지표로서 신뢰도, 복원도, 취약도 등을 사용한 바 있다(정상만과 신현민, 1994).

용수공급의 효율화를 최대화하고 비상시 저수지와 수자원 시스템의 최적운영을 위하여 저수지나 수자원 시스템의 운영에 영향을 미치는 주요 변수에 대한 분석절차는 크게 위험도 평가(risk assessment), 위험도 관리(risk management)단계로 나눌 수 있다(Annadale, 1991). 위험도 평가단계에서는 위험도의 수준을 결정하고 위험의 특징을 규명하며, 위험도 관리단계에서는 저수지나 수자원 시스템의 전체 수명에 걸쳐 위험도를 최소화하기 위한 방법들을 규명하는 단계이다.

본 연구에서는 위험도 평가단계에서 저수지의 용수공급에 대한 위험도 수준을 결정할 때, 결정 기준이 될 수 있는 신뢰도, 복원도, 복원도 지수, 취약도를 각각 정의한다. 그리고 장기간의 저수지 운영을 통한 신뢰도 분석을 위하여 추계학적 모의발생 기법을 이용하여 월 유입량 자료를 모의 발생시킨 후 대칭 다목적댐을 대상으로 저수지 물수지 분석을 실시하여 저수지의 용수공급에 대한 월 및 연 신뢰도와 양적기준 신뢰도를 산정한다. 또한 저수지 물수지 분석의 결과 다양한 용수수요량에 대한 저수지의 용수공급의 신뢰도를 평가하기 위한 추가 지표로 사용될 수 있는 복원도, 취약도 및 복원도 지수를 산정하여 수자원 관리 및 다목적 저수지의 최적운영을 위하여 이에 영향을 미치는 주요 인자들에 대한 위험도 평가를 실시하고 위험도 관리를 위한 지표로서의 적용가능성과 상호관계에 대하여 검토하고자 한다.

2. 수자원 시스템의 기능수행능력 평가지표

2.1 신뢰도

저수지 시스템의 설계 및 운영에 대한 기능수행능력 평가지표로서 사용되는 신뢰도를 수학적으로 표현하기 위하여 용수공급량을 시간에 따른 변수 X_t 로 표시하면 저수지 시스템의 상태는 공급량이 용수수요량을 충족시키는 경우와 충족시키지 못하는 두 가지 경우로 나눌 수 있다. 그 경우를 각각 S(operating state), F(failure state)의 집합으로 표시하면 임의 시점 t에서 용수공급상태는 두 집합 가운데 하나의 집합의 원소로 간주할 수 있다. 신뢰도 α 는 주어진 계획기간동안 시스템이 정상적으로 용수공급

을 수행할 확률로 정의되며 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha = \text{Prob}[X_t \in S] \quad (1)$$

여기서 α 는 신뢰도, S 는 용수수요의 충족상태이다.

식 (1)에서 α 로 표시한 신뢰도와 대응하는 개념인 위험도 β 는 임의 시점 t 에서 용수공급량이 용수수요를 충족시키지 못할 확률로 정의할 수 있으며, 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \beta &= \text{Prob}[X_t \in F] \\ &= 1 - \text{Prob}[X_t \in S] \\ &= 1 - \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 β 는 위험도, F 는 용수부족상태이다.

수자원 시스템의 설계 및 운영에 대한 신뢰도 분석시 널리 사용되는 신뢰도 개념으로는 빈도기준, 시간기준, 양적기준 신뢰도로 구분할 수 있다. 빈도기준 신뢰도는 전체 계획기간에 대한 용수수요를 충족시키는 기간의 비로 정의되며, 용수부족 발생빈도 개념이 포함되어 있으며, 주로 연 단위 신뢰도로 표현되며 기존의 신뢰도 분석 기준으로 가장 널리 사용되는 개념이다. 시간기준 신뢰도는 전체 계획기간에 대한 용수수요량을 충족시키는 지속기간과의 비로 정의되며, 용수부족 지속기간의 개념이 포함되어 있다. 그리고 양적기준 신뢰도는 주어진 기간동안 공급해야할 공급량에 대한 실제로 공급된 양과의 비로 정의되며, 용수부족량의 개념이 포함되어 있다. 그리고, 양적기준 신뢰도의 경우 용수수요량에 대한 용수공급량의 비로 표현하는 경우도 있다.

시스템의 설계 및 운영의 신뢰도 분석에 사용되는 신뢰도는 연 단위 신뢰도의 개념이 주로 사용되어 왔다 (Klemes 등, 1981; Vogel과 Bolognese, 1995). 그러나 시스템 파괴 상태의 정도와 그 결과에 대한 개념이 결여되어 있어서 시스템 파괴의 지속기간과 파괴 발생시 발생하는 부족량의 개념 등이 포함된 위험도 분석 기준의 제시가 필요하며 그 추가적인 기준으로 복원도 및 취약도의 개념이 사용될 수 있다.

2.2 복원도

시스템 파괴가 발생한 후 얼마나 빨리 정상상태로 회복되는가를 나타내는 개념으로 사용되는 것이 복원도 (resiliency) γ 이다. 저수지 시스템에 있어서 용수공급량이 수요량을 충족시키지 못하여 용수부족이 발생할 경우 용수부족이 얼마나 오래 지속될 것인가를 나타내는 평가 척도로 사용될 수 있으며 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\gamma = \frac{1}{E[T_F]} \quad (3)$$

여기서 T_F = 시스템 파괴 발생후 파괴상태의 지속기간, $E[T_F] = T_F$ 의 기대치로서 시스템 파괴상태의 평균지속기간 즉, 용수부족의 평균지속기간이다.

시간구간 $t=1-n$ 동안의 시스템의 상태표시 지수를 Z_t 라 두고, 시점 t 에서 시스템의 상태가 정상상태인 것이 시점 $t+1$ 에서 시스템이 파괴상태로 변하는 상태변화를 나타내는 지수를 W_t 라고 두면, Z_t 와 W_t 는 식 (4), (5)와 같이 표시할 수 있다.

$$Z_t = \begin{cases} 1, & X_t \in S \\ 0, & X_t \in F \end{cases} \quad (4)$$

$$W_t = \begin{cases} 1, & X_t \in S \text{ and } X_{t+1} \in F \\ 0, & \text{나머지 경우} \end{cases} \quad (5)$$

여기서 Z_t 는 시스템의 상태표시 지수, W_t 는 시스템의 상태변화를 나타내는 지수이다.

시스템이 파괴상태일 때 식 (4)에서 Z_t 의 값은 0이므로 전체계획기간 n 동안의 Z_t 의 평균치인 $(1/n) \sum_{t=1}^n Z_t$ 값은 전체 시스템에 대하여 시스템 파괴가 발생하지 않고 정상적으로 작동되고 있는 확률인 신뢰도 값을 나타낸다. 그리고 시점 t 에서 시스템이 정상상태에서 시점 $t+1$ 에서 시스템이 파괴상태로 전환될 확률을 ρ 라고 두면, ρ 는 식 (5)를 사용하여 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho &= \text{Prob}\{X_t \in S \text{ and } X_{t+1} \in F\} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n W_t \end{aligned} \quad (6)$$

전체계획기간 n 동안에 시스템 파괴가 발생하였을 경우 $E[T_F]$ 는 전체 계획기간동안 시스템이 파괴상태로 있는 기간의 상태표시 지수를 모두 합한 값에서 정상상태에서 파괴상태로 전환되는 횟수를 나눈 값과 같으므로 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[T_F] = \frac{A}{B} \quad (7)$$

여기서 $E[T_F]$ 는 시스템 파괴상태의 평균지속기간 즉, 용수부족의 평균지속기간, A 는 시스템이 파괴상태로 있는 기간 ($= \sum_{t=1}^n (1 - Z_t)$), B 는 시스템이 정상상태에서 파괴상태로 전환되는 횟수 ($= \sum_{t=1}^n W_t$)이다.

식 (4), (5)를 사용하여 식 (7)을 다시 정리하면 $E[T_F]$ 는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[T_F] = \frac{\sum_{t=1}^n (1-Z_t)}{\sum_{t=1}^n W_t} \quad (8)$$

식 (8)의 우변 항에 각각 n 을 나누고, $n \rightarrow \infty$ 일 때 $E[T_F]$ 는 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} E[T_F] &= \left\{ 1 - \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Z_t \right\} \left\{ \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n W_t \right\}^{-1} \\ &= \frac{1-\alpha}{\rho} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (3)에서 $E[T_F]$ 의 역수는 파괴상태에서 정상상태로 회복될 평균 회복률(average recovery rate)을 나타내므로 복원도(γ)는 식 (10)과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1}{E[T_F]} = \frac{\rho}{1-\alpha} \\ &= \frac{\text{Prob}\{X_t \in S \text{ and } X_{t+1} \in F\}}{\text{Prob}\{X_t \in F\}} \end{aligned} \quad (10)$$

저수지 시스템의 복원도를 평가하는 방법으로 널리 사용되는 방법으로 식 (11)과 같이 표현되는 복원도 지수(resiliency index) m 이 있다.

$$m = \frac{(1-d)\mu}{\sigma} = \frac{(1-d)}{C_v} \quad (11)$$

여기서 d 는 연평균 유입량에 대한 연간 용수수요량의 비이며, μ, σ, C_v 는 연 유입량의 평균, 표준편차, 변동계수이다.

저수지 시스템은 소규모 저수지의 경우로서 저수지가 고갈되고 만수되어 여수로 방류가 이루어지는 과정이 연간 여러 번 반복되는 within-year system과 대규모 저수지의 경우로서 저수지가 고갈되고 만수되어 여수로 방류가 이루어지는 과정이 수년에 한번 정도 반복되는 over-year system으로 크게 구분된다. 식 (11)의 복원도 지수 값은 over-year system인 경우 0에서 1사이 범위의 값을 갖지만 within-year system인 경우는 m 은 1보다 큰 값을 가지며, 복원도 지수가 0에 가까울수록 용수부족 상태에서 용수수요를 충족시키는 정상상태로의 회복이 늦어져서 복원도가 낮아진다(Vogel과 Stedinger, 1987).

식 (11)의 복원도 지수는 저수지가 고갈되어 용수부족이 발생한 후 정상적인 용수공급상태로 회복되는 기간이 짧을수록 큰 값을 나타내고, 길수록 작은 값을 나타내므로 본 연구에서는 복원도를 나타내는 지표로써 사용하였다.

2.3 취약도

취약도(vulnerability) δ 는 시스템 파괴의 결과가 얼마나 심각할 것인가를 나타내는 척도로써 발생 가능한 시스템 파괴의 크기 즉, 용수부족량을 의미한다. 복원도와 더불어 시스템 파괴의 결과를 나타내는 지표로 사용된다.

시스템의 취약도를 수학적으로 표현하기 위하여 시스템의 상태를 나타내는 시간에 따른 변수 X_t 를 이산화시켜 그 상태변수들을 X_1, X_2, \dots, X_n 이라고 하고, 이산화 시킨 변수 중에서 시스템이 파괴상태에 있을 사상들을 X_j 라 하면, 시스템의 취약도를 나타내는 정량적 지표는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \sum_{j \in F} s_j p_j \quad (12)$$

여기서 s_j 는 j 번째 사상에서 시스템이 얼마나 파괴되었는가를 나타내는 시스템 파괴 상태의 크기 즉, 용수부족량이고, p_j 는 시스템파괴 상태에서 s_j 에 상응하는 용수부족사상 x_j 의 발생확률이다.

취약도는 시스템파괴가 얼마나 오래 지속될 것인가(용수부족지속기간)보다 시스템파괴의 결과가 얼마나 심각할 것인가(용수부족량)의 양적인 면에 중점을 둔 것이며, 계산을 위하여 일정한 크기의 단위로 표현이 가능하다.

3. 이수기능평가를 위한 저수지 물수지 분석

3.1 유입량자료의 모의발생과 통계적 특성 비교

본 연구에서는 장기간의 저수지 물수지 분석을 실시하기 위하여 추계학적 모의 발생기법에 의해 대청댐 지점의 100년간의 월 유입량 자료를 모의 발생시켰다. 모의 발생을 위하여 사용한 월 유입량 자료는 대청댐 지점의 과거 34년(1958~1995)간의 월 유입량 자료를 사용하였으며, 댐건설로 인한 유입량 자료의 공백기간은 무시하고 댐 건설 전·후 전체 자료를 사용하였다.

저수지 운영을 위한 장기간의 유입량 자료의 확충을 위한 34년간의 대청댐 월 평균 유입량 계열의 적정확률 분포형을 결정하기 위하여 대상 분포형으로 정규, 대수정규, Gamma 분포형을 선정하였으며 이론적인 확률

표 1. 대청댐의 월별 유입량의 이론적 분포

월	이론적 분포	월	이론적 분포
1	Log-normal	7	Normal
2	Log-normal	8	Gamma
3	Log-normal	9	Log-normal
4	Log-normal	10	Log-normal
5	Gamma	11	Gamma
6	Log-normal	12	Log-normal

밀도함수를 구한 후 Kolmogorov-Smirnov 검정을 실시하여 관측유량계열의 적정확률분포형을 결정하였다. 그 결과 대수정규분포가 가장 적합한 것으로 나타났으며, 대청댐의 월별 유입량의 이론적 분포는 표 1과 같다.

본 연구에서 월 유입량의 모의 발생을 위하여 적정확률분포형인 2변수 대수정규분포형을 따르는 Thomas-Fiering 모형을 사용하여 100년간의 월 유입량 자료를 모의 발생시켰다(건설교통부, 1996).

모의발생된 유량계열이 관측유량 계열의 통계학적 특성을 잘 대표하는지를 검토하였다. 비교의 기준이 되는 통계 특성치는 평균치, 표준편차 및 왜곡도 계수로 하였으며, 모의발생시킨 유량자료를 하나의 시계열로 간주하고 실측치 및 모의발생시킨 자료의 계열상관도를 작성하여 그 결과치를 비교하였다. 과거기록자료와 모의발생시킨 자료의 통계적 특성치는 표 2와 같다.

월 유입량 자료의 추계학적 특성을 파악하기 위해서 월 유입량 자료를 수문학적 지속성(hydrologic persistence)

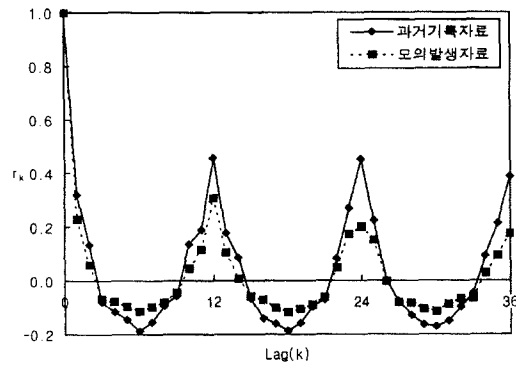


그림 1. 과거 유입량 자료와 모의발생시킨 유입량 자료의 계열상관도

검사를 한 결과 지속성을 가지는 시계열 자료였으며, 연 유입량의 경우 수문학적 지속성이 결여된 것으로 판명되었다. 수문학적 지속성 검사는 계열상관도 분석과 1차 계열 상관계수에 의하여 자료계열의 수문학적 지속성을 판정하는 Exact test를 사용하였다. 과거 유입량 자료와 모의발생된 유입량 자료의 계열상관도는 그림 1과 같다.

과거기록자료와 모의발생자료의 평균과 표준편차를 비교해 본 결과 월 평균의 경우는 모의발생자료의 월 평균은 과거기록자료와 거의 동일한 값을 나타내고 있으나 월별 표준편차의 경우는 모의발생자료의 표준편차가 과거기록자료의 표준편차 보다 크게 나타났으며, 실측 유입량 자료와 모의발생 유입량 자료의 계열상관도를 비교·분석해보면 그 파형이나 진폭에는 미

표 2. 과거기록자료와 모의 발생자료의 통계적 특성치

구분 월	과거기록자료(10^6 m^3)			모의발생자료(10^6 m^3)		
	평균	표준편차	왜곡도 계수	평균	표준편차	왜곡도 계수
1	58.3235	50.9924	2.4491	60.1093	57.2154	3.9319
2	91.5147	86.4339	1.8518	90.7647	95.4957	2.2433
3	152.2235	129.3446	2.1026	153.2731	126.6492	1.8512
4	205.0353	174.9860	2.1875	200.7354	173.7713	3.4516
5	156.3441	120.1133	0.9380	148.9129	169.9103	4.1775
6	163.5294	206.0300	2.6659	185.1841	469.6801	7.5153
7	805.5088	516.6498	0.2364	777.0782	948.7355	2.7321
8	506.8647	387.0577	1.1310	610.2259	632.2123	2.0740
9	433.6147	384.8433	1.0379	475.1216	506.9272	2.3107
10	107.7765	120.2179	3.3944	104.6765	89.2551	1.6920
11	78.1559	53.8841	1.0659	89.8361	98.1895	3.7376
12	62.9382	37.6571	0.9116	66.6206	51.6196	2.7899
연	2821.8294	1182.1194	0.2713	2957.5384	1550.2650	1.9251

소한 차이가 있으나 12개월을 주기로 비교적 동일한 주기가 반복됨을 알 수 있었다.

이상에서 보는 바와 같이 모의발생자료는 과거기록자료의 통계학적 특성을 잘 반영해 주는 것으로 판명되어 장기간의 저수지 물수지 분석을 위한 월 유입량 자료로 사용하였다.

3.3 저수지 물수지 분석

저수지 물수지 분석에서 저수지로의 입력은 댐지점에서 유입량과 저수지상에 떨어지는 강수량이며, 출력은 저수지 표면으로부터의 증발량, 방류량 및 용수요량이 포함되며 기본 방정식은 식 (13)과 같다(건설교통부, 1996).

$$S_j = S_{j-1} + I_j + R_j - E_j - O_j \quad (13)$$

$$S_j = S_{j-1} + I_{Nj} - O_j \quad (14)$$

$$I_{Nj} = I_j + R_j - E_j \quad (15)$$

$$D_j = M_j - O_j \quad (16)$$

여기서 S_{j-1} , S_j 는 $j-1$ 월과 j 월의 시작 시점에서 저수량, I_j , I_{Nj} 는 j 월의 유입량, 순유입량, R_j 는 j 월의 저수지상에 떨어지는 강수량, E_j 는 j 월의 저수지 표면으로부터의 증발량, O_j 는 j 월의 방류량, D_j 는 j 월의 용수부족량이며, M_j 는 j 월의 용수요량이다.

강수량의 경우 15년(1981~1995)간의 대청댐의 월별 평균 강수량 자료를 이용하였으며, 저수지상에 떨어지는 강수량을 체적으로 환산하기 위해서 매월의 저수지 평균수위에 해당하는 수표면적을 강수심에 곱하여 사용하여야 하지만 계산 값에 있어 큰 차이가 없을 것으로 가정하여 상시만수위에서의 수표면적을 곱하여 체적으로 환산하였다. 대청댐의 월 평균 강수량과 저수지 상에 떨어지는 강수량을 체적으로 환산한 것은 표 3과 같다.

증발 손실량의 경우는 대청댐 인근 대전 관측소에서 측정된 15년간(1981~1995)의 일 증발량 자료로부터 월 평균 증발량을 산정하고 증발접시계수 0.7을 적용하여 저수지 증발량을 산정하였다. 저수지 표면으로부터의 증발 손실량을 체적으로 환산하기 위해서는 매월의 저수지 평균수위에 해당하는 수표면적을 월 평균 증발량에 곱해주어야 하지만 수표면적은 다른 변수들에 비해서 영향이 작다고 판단하고 상시만수위에 해당하는 수표면적에서 발생한다고 가정하여 증발 손실량의 경우 상시만수위 때의 저수지 수표면적을 월 평균 증발량에 곱하여 저수지 표면으로부터의 증발량을 체적으로 환산하였다.

표 3. 대청댐 월 평균 강수량

월	강수량 월평균 강수량(mm)	강수총량(10^6 m^3)
1	30.7	1.97
2	37.3	2.40
3	49.2	3.16
4	64.0	4.11
5	73.2	4.71
6	126.7	8.15
7	279.2	17.96
8	228.0	14.66
9	128.1	8.24
10	49.5	3.18
11	44.0	2.83
12	26.6	1.71
연	1136.5	72.54

표 4. 대청댐의 평균 증발량과 저수지에서의 증발 손실량

구분	저수지증발량(mm)	총증발량(10^6 m^3)
1	24.4	1.57
2	31.2	2.00
3	53.5	3.44
4	83.7	5.38
5	100.9	6.49
6	96.5	6.20
7	88.9	5.71
8	90.9	5.85
9	70.5	4.53
10	56.7	3.65
11	32.3	2.08
12	24.8	1.59
연	754.3	48.49

표 4는 대전 관측소에서 관측된 증발량 자료로부터 산정한 월 평균 증발량과 저수지 증발량 및 저수지로부터의 증발 손실량을 나타내고 있다.

식 (13)의 기본방정식을 이용하여 유입량-공급량-저수량 관계를 분석하고 주어진 용수수요에 대한 용수부족량, 용수부족기간 및 용수공급의 신뢰도를 산정하기 위하여 저수지 운영 분석을 실시하였다.

저수지 물수지 분석에 있어서 기본 가정은 저수지 운영 초기에 저수지는 만수상태라고 가정하며, 분석 기간 중의 저수량은 대청댐의 생활, 공업, 관개 및 하천유지 용수의 공급을 위한 용량인 저수위(low water level) EL. 60.0 m와 상시만수위 EL. 76.5 m 사이의 유효저수용량 0 과 $790 \times 10^6 \text{ m}^3$ 사이의 범위에 있어야 한다고

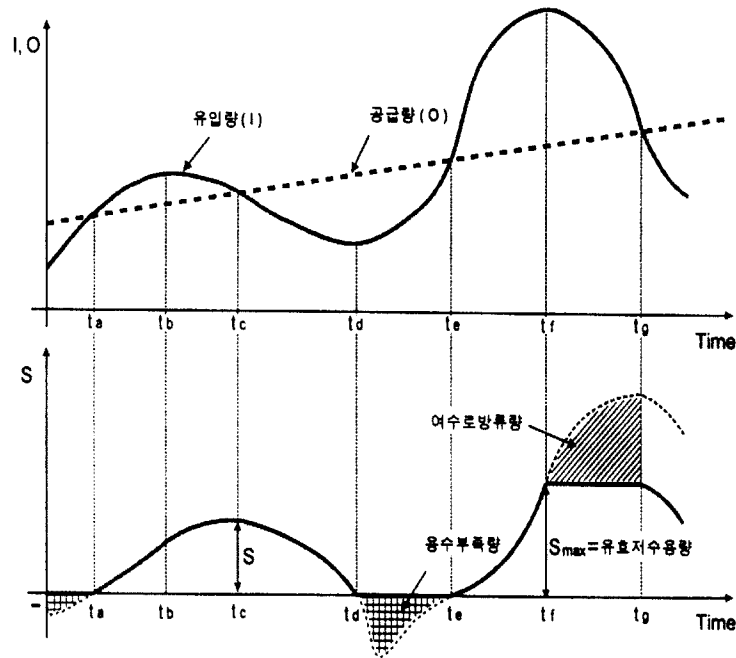


그림 2. 유입량-공급량-저수량 관계

가정하였다. 유효 저수용량을 초과하는 저수량은 모두 여수로를 통하여 방류되어 유효 저수용량 이내로 유지되며, 저수량이 0이하로 내려갈 경우에는 용수공급이 중단되고 저수지 표면으로부터의 증발에 의한 손실은 계속 발생하는 것으로 가정하였다. 그림 2는 저수지 운영시 유입량-공급량-저수량 관계를 나타낸 것이며, 빗금친 부분은 용수부족량과 여수로 방류량을 나타내며 각각의 경우 모두 초기에 발생된 상태가 지속되는 것으로서 저수지의 수위는 일정함을 뜻한다.

월별 용수수요량은 댐설계기준용량을 사용하여(한국수자원공사, 1994) 현재 대청댐의 월별 용수공급계획량과 동일한 형태로 발생하는 것으로 가정하고 100년간의 저수지 운영기간동안 연간 용수공급량에서 월별 용수공급계획량이 차지하는 비율을 용수수요량에서도 그대로 유지된다고 가정하였다.

4. 저수지 시스템의 이수기능평가

4.1 지표 산정의 절차

저수지 물수지 분석을 실시한 결과를 토대로 신뢰도의 경우 월, 년 신뢰도와 양적 기준 신뢰도를 산정하였다. 월 신뢰도의 경우 저수지 물수지 분석의 단위 시간이 월 단위이므로 식 (1)의 정의를 이용하여 전체 계획

기간 100년에 대한 용수공급량이 수요량을 충족시키는 상태에 있는 기간의 비를 계산하여 월 단위 신뢰도를 산정하고 이를 시간기준 신뢰도라고 정의하였다. 연 신뢰도의 경우 용수부족이 발생하는 월이 한번이라도 발생하는 월은 용수부족년으로 처리하여 전체 계획기간에 대한 용수수요를 충족시키는 연과의 비로 연 신뢰도를 산정하고 빈도기준 신뢰도라고 정의하였다. 양적기준 신뢰도의 산정을 위해서는 실제 용수수요량을 연간 용수수요량 값에 저수지 물수지 분석 기간 100년을 곱한 양으로 하였다. 그리고 실제로 공급된 양은 전체 계획기간동안의 용수수요량 값에서 총 용수부족량 값을 뺀 값으로 실제로 공급된 양을 산정하여 두 값 사이의 비를 계산하고 양적기준 신뢰도라고 정의하였다.

복원도의 경우 용수부족상태로 지속되는 평균 용수부족 지속기간의 역수로 정의되므로 용수수요 충족상태에서 용수부족 상태로 전환되는 횟수, 즉 식 (7)의 B값을 먼저 산정하였고, 이는 용수부족 사상수와 동일한 값을 갖는다. 그리고 용수부족상태에 있는 기간의 합, 총 용수부족기간(월)을 구하여, 두 값을 나눈 값으로 용수부족 평균지속기간(월)을 산정하여 한번 용수부족이 발생하였을 경우 평균 지속기간인 복원도 값을 산정하였다. 또한 식 (9)를 이용한다면 시점 t 에서 시

시스템이 정상상태에서 시점 $t+1$ 에서 시스템이 파괴상태로 전환될 확률인 ρ 값은 전체 계획기간(1,200월)에 대한 용수부족 사상수의 비와 같다. 그리고 분자의 $1-\alpha$ 의 경우 용수부족이 발생할 확률과 같으므로 전체 계획기간에 대한 용수부족기간과의 비로 표시할 수 있다. 그러므로 전체 계획기간에 대한 용수부족기간과의 비를 전체 계획기간에 대한 용수부족 사상수의 비로 나눈 값으로 복원도를 산정하여도 식 (7)을 이용한 방법과 마찬가지로의 결과를 가지므로, 본 연구에서는 전자의 방법으로 복원도를 산정하였다.

복원도 지수의 경우 연평균 유입량과 변동계수 값을 고정시켜 놓고 연간 용수수요량을 5% 간격으로 20%까지 증가시켰을 때 즉, 연 유입량에 대한 용수수요량이 차지하는 비 d 를 증가시키며 식 (11)을 이용하여 복원도 지수 값을 산정하였다.

취약도의 경우는 식 (12)에서 정의한 용수부족이 발생한 사상을 먼저 구하였다. 그리고 각 용수부족 사상별 용수부족량(s_j)을 구한 후 용수부족량에 상응하는 용수부족사상(x_j)이 발생한 확률을 곱하여 평균 용수부족량을 산정하여 한번 용수부족이 발생하였을 경우 용수부족의 크기를 나타내는 취약도를 산정하였다. 앞서 언급한 용수부족사상(x_j)이 발생할 확률(p_j)은 전체 계획기간에 대한 임의의 용수부족사상의 발생확률이 아니라,

전체 용수부족 사상수에 대한 임의의 용수부족사상이 발생할 확률로 정의하였다.

4.2 이수가능평가의 결과

대청 다목적댐을 대상으로 용수수요량이 현재 수준에서 20%까지 증가되었을 경우 용수부족 사상수, 총 용수부족기간, 평균용수부족기간, 총 용수부족량 및 평균 용수부족량 등을 산정하여 이수가능평가 지표를 산정하였다. 용수공급의 신뢰도, 복원도, 복원도 지수, 취약도를 산정하기 위하여 저수지 운영분석을 실시한 결과를 표 5에 나타내었다.

신뢰도의 경우 빈도, 시간, 양적 기준 신뢰도를 산정하기 위하여 빈도기준의 경우 연 기준 신뢰도를, 시간기준의 경우 월 기준 신뢰도를 각각 산정하고 양적기준 신뢰도를 산정하였으며, 용수수요량 증가에 따른 각각의 신뢰도 변화를 그림 3에 나타내었다.

신뢰도는 용수수요량이 증가함에 따라 세 가지 기준 모두 신뢰도 값이 감소하였고, 빈도 기준 신뢰도의 감소 폭이 가장 크게 나타났다. 또한 빈도, 시간, 양적 기준 신뢰도 순으로 값이 크게 나타났으며, 이는 용수부족이 발생하는 연 중에서도 용수부족이 발생하지 않는 지속기간 즉, 용수부족이 발생하지 않는 월이 포함되어 있기 때문인 것으로 볼 수 있다.

표 5. 대청댐의 용수공급에 대한 기능수행능력평가 산정 결과

평가 지표	용수수요량		용수수요량				
	현재	5% 증가	10% 증가	15% 증가	20% 증가		
용수수요량($10^6\text{m}^3/\text{년}$)	1649.00	1731.45	1813.90	1896.35	1978.80		
용수부족 사상수	13	22	28	36	49		
용수부족량(10^6m^3)	총부족량	1455.21	2919.51	4828.18	7379.14	10608.68	
	평균부족량	111.94	132.71	172.44	204.98	216.50	
	최대부족량	월	193.07	218.58	242.18	262.31	273.82
		사상	274.68	353.03	438.20	553.54	668.87
용수부족기간	총부족기간(월)	21	43	61	74	123	
	총부족기간(년)	11	19	26	32	40	
	평균부족기간(월)	1.62	1.95	2.18	2.06	2.51	
	최대부족기간(월)	4	5	6	7	8	
신뢰도(%)	월 기준	98.25	96.42	94.92	93.83	89.75	
	연 기준	89.00	81.00	74.00	68.00	60.00	
	양적 기준	99.12	98.31	97.34	96.11	94.64	
취약도(10^6m^3)	111.94	132.71	172.44	204.98	216.50		
복원도(1/기간)	0.6190	0.5116	0.4590	0.4865	0.3984		
복원도 지수	0.8440	0.7901	0.7396	0.6838	0.6295		

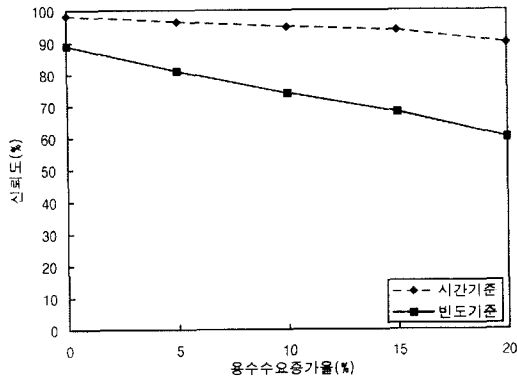


그림 3. 용수수요량 증가에 따른 신뢰도 변화

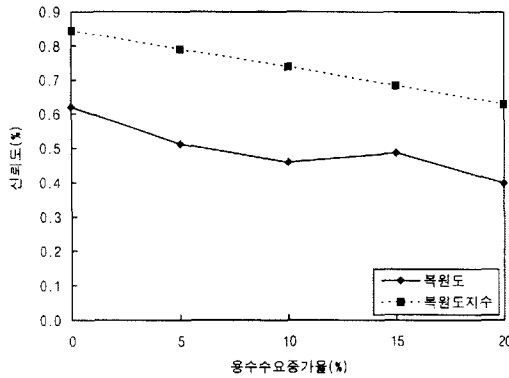


그림 4. 용수수요량 증가에 따른 복원도 변화

용수부족 평균지속기간의 역수로 정의되는 복원도의 경우도 신뢰도와 마찬가지로 용수수요량이 증가함에 따라 감소하는 추세를 나타내었으며, 이는 한번 용수부족이 발생하였을 경우 용수부족이 비교적 장기간 지속됨을 나타낸다. 복원도 지수의 경우는 복원도와 마찬가지로 용수수요량이 증가함에 따라 감소하는 추세를 보이고 있으며, 대청댐의 경우 over-year system으로 볼 수 있으며, 이는 복원도 지수 값이 1보다 작은 값을 가지는 것으로 확인할 수 있었다. 용수수요량의 증가에 따른 복원도 및 복원도 지수를 그림 4에 나타내었다.

평균 용수부족량으로 정의되는 취약도의 용수수요량의 증가에 따른 변화를 그림 5에 나타내었다. 용수수요량이 증가함에 따라 용수부족발생 사상수의 증가분보다 총 용수부족량의 증가분이 더 커져서 취약도가 점차 증가하는 것으로 나타났다.

용수수요량의 증가에 따른 신뢰도와 복원도와의 관계를 그림 6에 나타내었으며, 복원도와 취약도의 관계를 그림 7에 나타내었다. 복원도와 취약도의 관계에서 볼

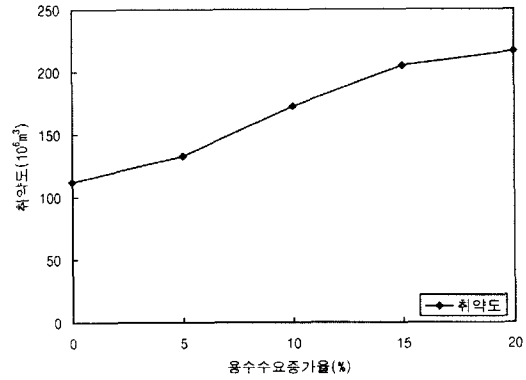


그림 5. 용수수요량 증가에 따른 취약도 변화

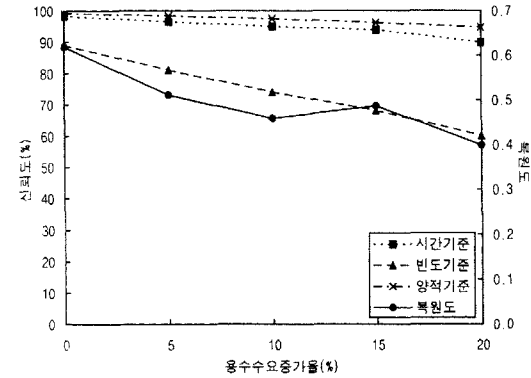


그림 6. 용수수요량 증가에 따른 신뢰도와 복원도와의 관계

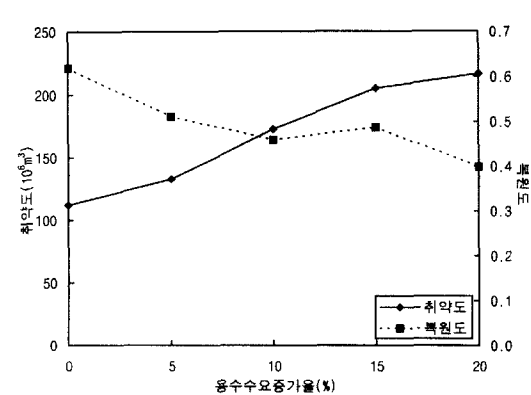


그림 7. 용수수요량 증가에 따른 복원도와 취약도와의 관계

때 평균용수부족 지속기간이 길어짐에 따라 용수부족 발생횟수와 총 용수부족량은 증가하지만, 용수부족 사상수의 증가는 비교적 작은 증가율을 보였으며, 총 용수부족량을 용수부족 사상수로 나눈 값인 평균 용수부족량 즉, 취약도는 증가하게 됨을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 용수공급의 효율화를 최대화하고 비상시 수자원 시스템의 최적운영을 위하여 수자원 시스템에 존재하는 위험도에 대한 분석 절차를 위험도 평가와 위험도 관리단계로 나누어 위험도 평가 단계를 중심으로 위험도 분석을 실시하였다. 대형 다목적댐을 대상으로 100년간의 유입량 자료를 추계학적으로 모의 발생 시켜 용수수요량을 20%까지 증가시키면서 저수지 물수지 분석을 실시하였다.

저수지 물수지 분석에 의해 용수부족사상수, 부족량, 부족기간 등을 산정하였으며, 이를 토대로 용수공급의 신뢰도, 복원도, 취약도 및 복원도 지수를 산정하였으며, 결론은 다음과 같다.

(1) 용수수요량을 현 단계에서 20%까지 증가시킨 결과 빈도, 시간, 양적기준 신뢰도 모두 감소하는 추세가 나타났으며 빈도, 시간, 양적기준 신뢰도 순으로 신뢰도가 크게 나타났다. 또한 양적, 시간, 빈도 기준 신뢰도 순으로 감소폭이 크게 나타났다.

(2) 용수수요량 증가함에 따라 평균용수부족 지속기간이 증가하여 복원도는 감소하는 추세가 나타났지만 평균용수부족량의 증가로 인한 취약도는 증가하였다.

(3) 복원도 지수의 경우 평균지속기간의 역수로 구한 복원도와는 산정방법에 있어서 차이는 있지만 복원도와 마찬가지로 용수수요량이 증가함에 따라 감소하는 추세가 나타났다.

(4) 위험도 평가단계를 중심으로 연구를 수행하였으며, 그 분석 대상을 저수지로 한정하였다. 아울러 본 연구에서 제시한 위험도 기준들을 불확실성 하에서 저수지 시스템의 관리 및 최적운영을 위한 의사결정의 한 과정으로 이용될 수 있을 것으로 기대되며, 주어진 전체 수명 기간동안 저수지 시스템의 관리 및 최적운영을 위하여 위험도를 최소화하기 위한 위험도 관리에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부로부터 위탁받아 한국수자원학회가 수행한 학술용역 '1996년도 국제수문개발계획(IHP) 5단계 연구사업' 중 '가뭄기간의 수자원관리 및 위험도 분석과 의사결정기구 : 저수지 물공급을 위한 신뢰도 분석에 관한 연구'의 결과로서 연구지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (1996). 국제수문개발계획(IHP) 연구보고서, 고석구, 고익환, 이광만 (1991). 신뢰도를 고려한 저수지의 월별 운영률 개발. 연구보고서, 수자연, 91-WR-4, 한국수자원공사, 수자원연구소.
- 정상만, 신현민 (1994). 다목적댐의 용수공급능력 평가 방법의 개선. 연구보고서, 전기연 94-WR -111, 한국건설기술연구원.
- 한국수자원공사 (1994). 다목적댐 운영 실무편람.
- Annandale, G.W. (1991). "On deciding between the use of engineering standards and risk analysis." *Risk-based decision making in water resources V*, Edited by Haines, Y.Y., Moser, D.A. and Stakhiv, E.Z., ASCE, pp. 219-235.
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R., and Loucks, D.P. (1982). "Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation." *Water Resources Research*, Vol. 18, No.1, pp. 14-20.
- Klemes, V. (1969). "Reliability estimates for a storage reservoir with seasonal input." *J. Hydrol.*, Vol. 13, No. 2, pp. 198-216.
- Klemes, V., Srikanthan, R., and McMahon, T.A. (1981). "Long-memory flow models in reservoir analysis: What is their practical value?" *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 3, pp. 737-751.
- Moy, M. (1986). "A programming model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir." *Water Resources Research*, Vol. 22., No. 4, pp. 489-498.
- Vogel, R.M. and Stedinger, J.R. (1987). "Generalized storage-reliability-yield relationships." *J. of Hydrology*, Vol. 87, No. 1, pp. 303-327.
- Vogel, R.M. and Bolognese, R.A. (1995). "Storage-reliability-yield relations for over-year water supply systems." *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 3, pp. 645-654.

Votruba, L., and Broza, V. (1989). *Water management in reservoirs*. Elsevier,

Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo.

〈최종본 접수일 : 1997년 9월 1일〉