



## Probabilistic prediction of reservoir storage considering the uncertainty of dam inflow

Kwon, Minsung<sup>a</sup> · Park, Dong-Hyeok<sup>b</sup> · Jun, Kyung Soo<sup>a</sup> · Kim, Tae-Woong<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>Graduate School of Water Resources, Sungkyunkwan Univ., Suwon 16419, Korea

<sup>b</sup>Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang Univ., Seoul 04763, Korea

<sup>c</sup>Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang Univ., Ansan 15588, Korea

Paper number: 16-037

Received: 3 April 2016; Revised: 10 May 2016 / 28 May 2016; Accepted: 28 May 2016

### Abstract

The well-timed water management is required to reduce drought damages. It is also necessary to induce residents in drought-affected areas to save water. Information on future storage is important in managing water resources based on the current and future states of drought. This study employed a kernel function to develop a probabilistic model for predicting dam storage considering inflow uncertainty. This study also investigated the application of the proposed probabilistic model during the extreme drought. This model can predict a probability of temporal variation of storage. Moreover, the model can be used to make a long-term plan since it can identify a temporal change of storage and estimate a required reserving volume of water to achieve the target storage.

**Keywords:** Drought, Probabilistic Prediction, Uncertainty, Water Management

## 댐 유입량의 불확실성을 고려한 저수량의 확률론적 예측

권민성<sup>a</sup> · 박동혁<sup>b</sup> · 전경수<sup>a</sup> · 김태웅<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>성균관대학교 수자원전문대학원, <sup>b</sup>한양대학교 대학원 건설환경공학과, <sup>c</sup>한양대학교 공학대학 건설환경플랜트공학과

### 요 지

가뭄의 피해를 줄이기 위해서는 시기적절한 용수관리와 지역주민의 절수 유도가 필요하며, 이를 위해서는 가뭄의 현황 및 전망에 대한 정보가 무엇보다 중요하다. 특히 생·공용수를 공급하는 다목적댐의 경우 저수량에 대한 향후 전망은 용수관리를 위한 가장 중요한 정보이다. 이에 본 연구에서는 핵밀도함수를 활용하여 유입량의 불확실성을 고려한 확률론적 저수량 예측 모형을 구축하고, 그 적용성과 활용성을 분석하였다. 확률론적 저수량 예측 모형은 현재의 저수량을 기준으로 시간의 변화에 따른 저수량을 확률적으로 예측할 수 있다. 이를 통해 현재의 가뭄상황에서 향후 저수량의 변화 양상을 파악하여 중장기적인 대응이 가능하고 특정시점의 목표 저수량을 달성하기 위한 용수 비축량을 산정할 수 있어 용수관리에 관한 의사결정을 위한 도구로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

**핵심용어:** 가뭄, 확률론적 예측, 불확실성, 용수관리

### 1. 서 론

2014년과 2015년의 연속된 극심한 가뭄으로 생활용수와 공업용수를 공급하는 다목적댐 중 9곳이 용수공급 조정 기준

이하의 저수량을 기록하였고, 저수량 부족에 따라 하천유지 용수 및 농업용수에 대한 감량을 실시하는 등 용수 비축을 위해 노력하였다(K-water, 2016). 가뭄은 홍수와 달리 장기적으로 나타나며 그 끝이 언제일지 알 수 없으며, 사회적으로 광범위한 피해가 발생하는 자연재해로 기후변화로 인한 가뭄 발생 빈도 및 심각성이 더욱 증가할 것으로 예상되고 있다(WMO, 2009; Sheffield et al., 2012). 따라서 가뭄에 대한 대비를 더욱

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-400-5184  
E-mail: twkim72@hanyang.ac.kr (T. -W. Kim)

철저히 해야 할 필요성에 넓은 공감대가 형성되고 있다.

가뭄 피해를 저감하는 방법으로는 사전 용수 비축, 가뭄의 진행 상황 파악 및 향후 전망을 통한 대응을 들 수 있다. 실제 가뭄 상황이 심각해지면 댐간 연계 운영 등 다양한 용수관리 방법 등이 실시될 수 있으나, 용수공급 가능 저수량이 지속적으로 부족해지면 강제적인 급수조정이 불가피하다. 이러한 강제적인 급수조정은 주민들의 생활에 큰 불편을 초래하고 사회, 경제적으로 큰 피해를 가져온다. 2015년 보령댐의 저수량이 심각한 수준으로 감소하였을 때, 주민들의 물 절약을 유도하는 다양한 홍보활동을 통한 자율적인 물 절약으로 사용량을 20%(일 평균 33천 m<sup>3</sup>) 절감하였다. 이는 가뭄의 현황 및 향후 전망에 대한 정보를 통해 용수관리자가 시기적절한 판단을 내렸기에 가능했으며, 주민들에게 가뭄 상황에 대한 정보 전달이 적절했기에 가능했다. 가뭄의 현황 및 전망에 대한 정보가 가뭄피해를 줄이기 위해 무엇보다 중요하다는 것을 확인할 수 있다.

현재 가뭄의 정보는 다양한 가뭄지수를 통해 제공되고 있다. 수많은 가뭄지수가 존재하지만 주로 많이 사용되는 가뭄지수로는 Palmer Drought Severity Index (PDSI) (Palmer, 1965), Standardized Precipitation Index (SPI) (McKee et al., 1993), Surface Water Supply Index (SWSI) (Shafer and Dezman, 1982), Water Availability Drought Index (WADI) (Park et al., 2011) 등이 있다. 앞에서 언급된 가뭄지수들은 현재의 가뭄상황을 정량적으로 표현하는 지수이다. 현재의 가뭄상황이 향후 물공급에 미치는 영향을 평가해주는 가뭄지수로는 Water Supply Capacity Index (WSCSI) (Lee et al., 2006)가 있다. WSCSI는 가뭄이 발생했을 때 저수지의 유입량이 없다는 최악의 상황에서 용수공급능력이 몇 개월이나 유지될 수 있는지를 판단하는 지표이다. 따라서 WSCSI는 저수지의 가용 수자원량을 평가할 수 있으나, 최악의 상황이라는 확정적인 조건 하나만을 고려하기 때문에 중장기 가뭄대응을 위한 정보로는 한계가 있다.

댐 유역에서의 가뭄 현황 및 전망을 위해서는 유입량과 공급계획량 등을 고려하여 시간에 따른 저수량 변화에 대한 정보가 필요하다. 공급계획량은 일정한 용량으로 결정되어 있지만, 미래의 유입량은 특정 값으로 예측하는 것은 불가능하므로 향후 저수량에 대한 확률론적 예측이 필요하다. 이에 본 연구에서는 유입량의 불확실성을 고려하여 저수량에 대한 확률론적 예측 모형을 구축하고, 이를 통해 시간 변화에 따른 저수량의 확률론적 예측 정보를 확보하고 효과적인 용수관리를 위한 의사결정 지원 도구로서의 활용방안을 제시하였다.

## 2. 저수량의 확률론적 예측 모형

본 연구에서는 월 단위의 유입량 관측자료와 용수공급 계획량을 활용하여 저수량의 확률론적 예측 모형을 구축하였다. 본 연구에서는 한 달 단위로 분석하였으나, 시간 간격은 유입량 자료에 따라 변경이 가능하다.

현재의 저수량을 기준으로 향후 저수량에 대한 확률분포는 Eq. (1)과 같이 결합주변확률밀도함수(joint marginal probability density function)를 통해 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned} f_1(S_{j+1}) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(S_{j+1}, S_j) dS_j \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(S_{j+1}|S_j) f(S_j) dS_j \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $f(S_j)$ 는  $j$ 월 저수량의 확률밀도함수(probability density function)이고,  $f(S_{j+1}|S_j)$ 는  $j$ 월의 저수량에 따른  $(j+1)$ 월의 저수량의 확률밀도함수이다. 본 연구에서는 비모수적 핵밀도함수(non-parametric kernel density function)를 적용하였는데, 핵밀도함수를 사용하면 월 유입량별 적정 분포형을 고려하지 않아도 되고, 저수지의 용량 범위 내에서 확률밀도함수를 산정할 수 있는 장점이 있다.  $f(S_{j+1}|S_j)$ 를 핵밀도함수를 이용하여 표현하면 Eq. (2)와 같다.

$$\hat{f}(S_{j+1}|S_j) = \frac{1}{nh} \sum_{m=1}^n K\left(\frac{S_{j+1} - (S_{j+1,m}|S_j)}{h}\right) \quad (2)$$

여기서,  $K$ 는 핵함수이고,  $I_{j+1,m}$ 는  $(j+1)$ 월의 유입량 관측값이며,  $O_{j+1}$ 는  $(j+1)$ 월의 용수공급 계획량이다. 그리고  $n$ 은 유입량 관측값(표본)의 개수이며,  $h$ 는 핵밀도함수의 광역폭(bandwidth)을 나타내고 있다. Eq. (2)에서  $(S_{j+1,m}|S_j)$ 는  $S_j$ 월의 저수량에 대한  $S_{j+1}$ 월의 저수량이므로 Eq. (3)과 같이 표현할 수 있으며, Eqs. (2)와 (3)을 Eq. (1)에 대입하면 Eq. (4)와 같다.

$$S_{j+1,m}|S_j = S_j + I_{j+1,m} - O_{j+1} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f_1(S_{j+1}) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{nh} \sum_{m=1}^n K\left(\frac{S_{j+1} - (S_j + I_{j+1,m} - O_{j+1})}{h}\right) f(S_j) dS_j \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{nh} \sum_{m=1}^n K\left(\frac{S_{j+1} - AS_{j+1}}{h}\right) f(S_j) dS_j \quad AS_{j+1} = S_j + I_{j+1,m} - O_{j+1} \end{aligned} \quad (4)$$

$j$ 월 저수량에 대해  $(j+1)$ 월의 유입량 자료와 용수공급량을 단순계산하면, 저수량이 낮을 때, 유입량보다 용수공급량이 많을 경우 음(-)의 저수량 또는 용수공급 불가능 용량보다 낮은 값을 산정할 수 있다. 또한 때에 따라 저수지 용량 이상의 저수량이 산정될 수 있다. 하지만 저수지는 저수공간이 제한되어 있으며, 일정 용량 이하에서는 용수공급이 불가능하다. 이러한 상황을 반영하기 위하여  $AS_{j+1}$ 은 Eq. (5)와 같이 적용하였다.

$$AS_{j+1} = \begin{cases} U & \text{for } AS_{j+1} > U \\ AS_{j+1} & \text{for } L < AS_{j+1} < U \\ L & \text{for } AS_{j+1} < L \end{cases} \quad (5)$$

여기서,  $U$ 는 상시만수위 용량 또는 홍수기 제한수위 용량을 적용한 상한계이며,  $L$ 은 용수공급 불가능 용량을 적용한 하한계를 나타내고 있다. 하지만, 저수용량 이내로  $AS_{j+1}$ 을 한정하더라도 확률밀도함수의 꼬리부분에 의해 상한계와 하한계를 벗어나는 값이 추정된다. 이를 방지하기 위해 상한계와 하한계를 설정할 수 있는 경계핵밀도함수(boundary kernel density function)를 활용할 수 있다(Eq. (6)). 경계핵밀도함수를 구하기 위해서는 변환된 자료  $t(x)$ 를 이용하여 핵밀도함수를 구할 수 있다(Bowman and Azzalini, 1997; Wand and Jones, 1995).

$$f(x) = g(t(x))t'(x)$$

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{t(x) - t(X_i)}{h}\right)t'(x) \quad (6)$$

여기서,  $g(\cdot)$ 는  $t(x)$ 의 확률밀도함수를 나타낸다.  $[L, U]$  구간에 대한  $t(x)$ 는 Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있으며, Eq. (7)을 Eq. (4)에 대입하고,  $f(S_j)$ 는 확률밀도함수로  $\int_{-\infty}^{\infty} f(S_j) = 1$ 과 같으므로 Eq. (4)는 Eq. (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$t(x) = \log(x - L) - \log(U - x) \quad (7)$$

$$f_1(S_{j+1}) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{nh} \sum_{m=1}^n K\left(\frac{t(S_{j+1}) - t(AS_{j+1})}{h}\right)t'(S_{j+1}) \frac{f(S_j)}{\int_{-\infty}^{\infty} f(S_j)} dS_j \quad (8)$$

Eq. (8)을 직접 계산하기 어려우므로 구간을 일정하게 나뉘 근사하게 되면, Eq. (8)은 Eq. (9)와 같이 나타낼 수 있고, 이는 결과적으로 하나의 핵밀도함수가 되어 계산이 간편해진다.

$$f_1(S_{j+1}) \approx \frac{1}{nh} \sum_{k=1}^r \sum_{m=1}^n K\left(\frac{t(S_{j+1}) - t(AS_{j+1})}{h}\right)t'(S_{j+1}) \frac{f(S_j)}{\sum_{k=1}^r f(S_j)} \quad (9)$$

여기서,  $r$ 은  $S_j$ 의 구간 개수이다.

본 연구에서는 가우시안 함수(gaussian function)를 핵밀도함수로 사용하였으며, 광역폭은 가우시안 함수를 사용할 경우 최적 광역폭으로 제안된 Eq. (10)을 사용하였다(Bowman and Azzalini, 1997).

$$h = \left(\frac{4\sigma^5}{3n}\right)^{1/5} \quad (10)$$

여기서,  $\sigma$ 는 표준편차이며,  $n$ 은 앞서 언급한 바와 같이 유입량의 표본 개수이다.

동일한 방법으로  $j$ 월의 저수량을 달성할 수 있는  $(j-1)$ 월의 저수량에 대한 확률분포를 구할 수 있다. Eq. (1)은 Eq. (11)과 같이  $(j-1)$ 월에 대한 주변분포함수로 나타낼 수 있으며, 이전과 동일한 방법으로 계산을 하면 특정(또는 목표) 월의 저수량을 달성할 수 있는 이전 저수량에 대한 확률분포를 Eq. (12)를 통해 산정할 수 있다. 이는 용수공급조정 용량 및 용수공급조정 기준을 설정하는데 활용될 수 있다.

$$f_1(S_{j-1}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(S_{j-1}, S_j) dS_j$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} f(S_{j-1}|S_j) f(S_j) dS_j \quad (11)$$

$$f_1(S_{j-1}) \approx \frac{1}{nh} \sum_{k=1}^r \sum_{m=1}^n K\left(\frac{t(S_{j-1}) - t(BS_{j-1})}{h}\right)t'(S_{j-1}) \frac{f(S_j)}{\sum_{k=1}^r f(S_j)} \quad (12)$$

여기서,  $BS_{j-1} = S_j - I_j + O_j$

### 3. 모형의 적용 및 적용성 평가

#### 3.1 연구대상지역 선정

보령댐의 경우는 2015년 8월 용수공급 조정 기준이 생활·공업용수를 감량해야 하는 심각단계에 돌입했고, 2015년 11월 기준 댐 저수율이 역대 최저 수준인 18.9%로 일부 상류지역은 밑바닥을 드러냈다. 이에 본 연구에서는 저수량의 확률론

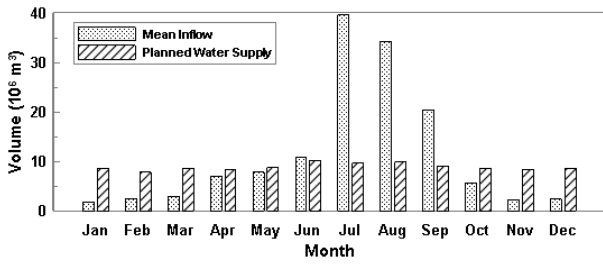


Fig. 1. Mean inflow and planned water supply

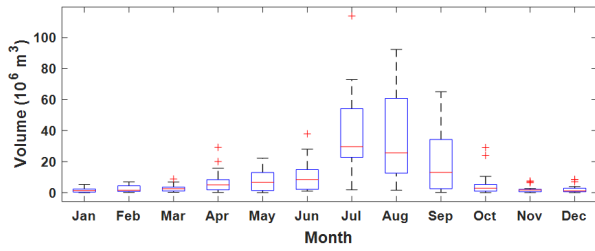


Fig. 2. Boxplot of monthly inflow

적 예측모형을 보령댐에 적용하여 모형의 적용성을 평가하였으며, 이를 토대로 가뭄 시 용수관리 의사결정을 위한 활용 방안을 제시하였다.

보령댐은 충남 보령시에 위치하고 있으며, 총 저수용량 116.9백만 m<sup>3</sup>, 유효저수용량 108.7백만 m<sup>3</sup>로 8개 지하채(보

Table 1. Observed storage in September to December (unit: 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)

Month	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Storage	26.22	22.85	25.71	29.29

령시, 서산시, 서천군, 청양군, 홍성군, 예산군, 태안군, 당진시)에 용수를 공급하는 다목적 댐이다. 분석에 사용된 유입량 및 저수량은 한국수자원공사에서 제공하는 1998년부터 2015년까지 자료를 활용하였으며, 용수공급 계획량은 댐 운영실무편람(K-water, 2013)을 참고하였다. Fig. 1은 보령댐의 월평균 유입량과 월별 용수공급 계획량을 나타내고 있다. 7~9월 우기를 제외하고는 용수공급 계획량이 유입량보다 많으며, Fig. 2에서 보는 바와 같이 변동성이 큰 우기에 가뭄이 발생하면 비우기의 용수공급에 큰 차질을 빚을 수밖에 없다.

### 3.2 모형의 적용 및 활용성 평가

본 연구에서 제안한 저수량의 확률론적 예측 모형을 통해 2015년 9월부터 12월 말까지 보령댐의 관측 저수량(Table 1)을 토대로 용수공급 계획량대로 공급하였을 경우 각 시기별 저수량에 대한 누적분포함수(cumulative distribution function, 이하 CDF)를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 나타낸 CDF는 비초과확률로 해당 저수량 아래에 있을 확률을 나타낸다. 9월 말을 기준으로 분석한 경우 1월부터 저수량이 바닥을 드러낼

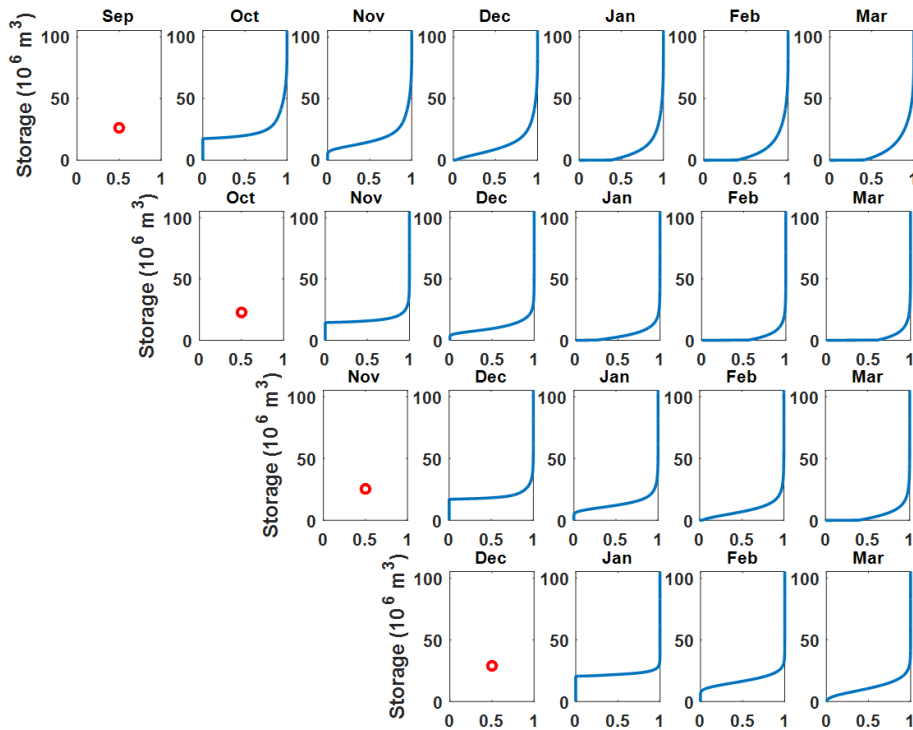


Fig. 3. Temporal change of probabilistic storage. 'o' indicates the initial storages which were observed at the end of September to December

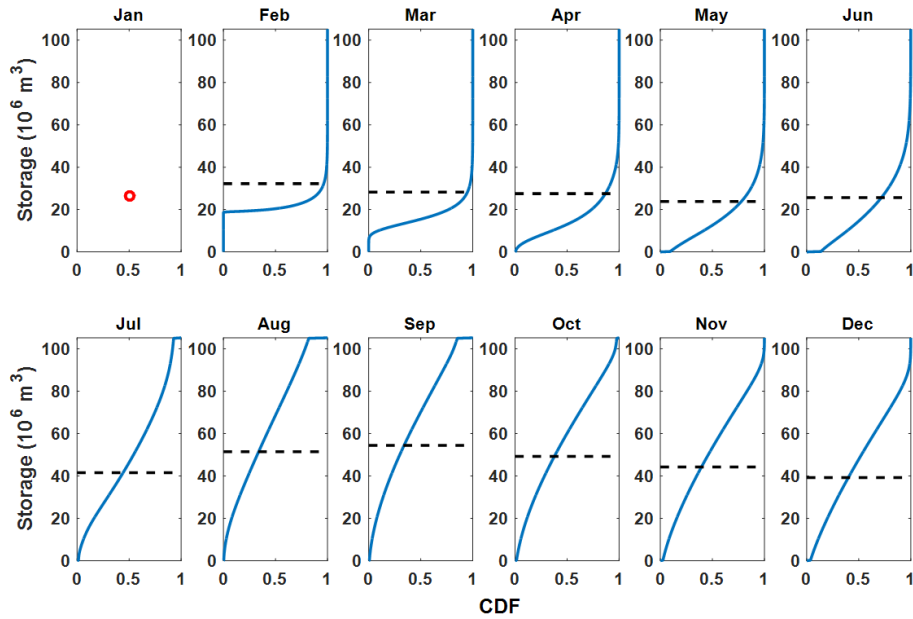


Fig. 4. Temporal change of probabilistic storage and storage of Level-1 (dash line). Initial storage (marker 'o'):  $26.62 \times 10^6 \text{ m}^3$  at the end of January

확률이 0.5에 가까울 정도로 심각한 수준으로 나타났다. 10월 말 기준의 경우도 1월부터 바닥을 드러낼 확률이 매우 높아지고 2월과 3월로 갈수록 그 확률이 더욱 높아져 당시 저수량 부족의 심각성을 확인할 수 있다. 11월 말 기준의 저수량으로도 3월이면 바닥을 드러낼 확률이 매우 높다는 것을 확인할 수 있으며, 12월 말 기준 저수량으로 분석한 결과는 9~11월까지의 분석 결과보다는 양호한 결과를 확인할 수 있다. 이는 2015년 12월 유입량이 12월 평균 유입량보다 약 3.5배 많았으며, 8월부터 단계적으로 용수비축을 한 결과로 판단된다. 이는 현재의 가뭄 상황을 바탕으로 향후 저수량의 시간에 따른 변화를 확인할 수 있고, 현재의 가뭄이 앞으로 미치는 영향을 평가할 수 있는 자료로 용수관리 및 가뭄 정보전달에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

Fig. 4는 Fig. 3과 같은 방법으로 1월 말의 관측 저수량 ( $26.12 \text{ 백만 m}^3$ )을 토대로 향후 저수량의 CDF를 나타낸 것이다. 점선은 용수공급 조정 기준의 관심단계(Level-1)의 저수량을 나타내고 있다. 1월 말 현재의 저수량에 대해 공급계획량대로 용수를 공급할 경우, 우기 전까지는 관심단계를 회복하는 것도 매우 어려울 것으로 예상된다.

Fig. 5는 1998년부터 2015년까지의 월 저수량의 변화를 연도별로 도시한 후, 1월 저수량을 Fig. 4의 초기 저수량( $26.12 \text{ 백만 m}^3$ )을 기준으로 월 저수량을 변환한 것을 연도별로 도시한 것이다. 여기에 관심단계 기준 저수량을 점선으로 표현하여, 기준 저수량보다 크면 'x'로 작으면 'o'로 표현한 것이다.

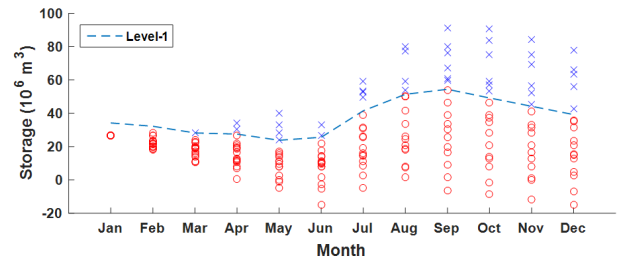


Fig. 5. Relative variation of storage corresponding to the initial storage. The line indicates the threshold of Level-1, 'x' and 'o' represent the storages above Level-1 and below Level-1, respectively

이를 통해 월별 관심단계 이하의 확률을 산정할 수 있으며, 이와 같이 산정된 관심단계 이하의 확률과 Fig. 4의 모형의 관심단계 이하의 확률을 비교하여 모형의 적용성 및 활용성을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 Figs. 4~5에서 산정한 관심단계 이하의 확률을 비교해서 나타낸 것이다. 1월부터 6월까지의 모형에서 예측한 확률과 유사한 값을 나타내고 있으나, 7월부터 차이가 커져 8월에 가장 큰 차이를 나타내고 있다. 이는 홍수기 예비 방류를 하였으나, 유입량이 그 양에 미치지 못해 나타나는 결과로 판단되며, 이후는 이의 영향으로 모형과 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 이에 홍수기 영향을 줄이고 모형의 적용성을 평가하기 위해 9월 말의 저수량을  $55 \text{ 백만 m}^3$ 로 가정하고 Figs. 4~6까지의 과정을 수행한 결과를 Fig. 7에 나타내었고, Fig. 8

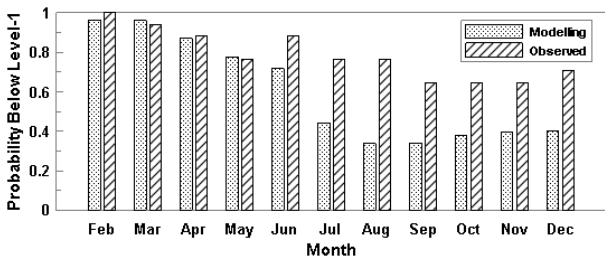


Fig. 6. Comparison with modeled and observed probabilities below Level-1

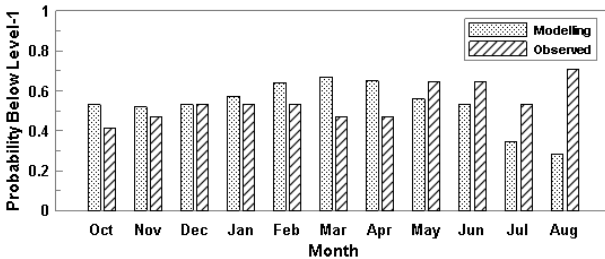


Fig. 7. Comparison between modeled and observed probability below Level-1. Initial storage:  $55 \times 10^6 \text{ m}^3$  at the end of September

에는 이의 경험적 CDF와 저수량의 확률론적 예측 모형의 CDF를 비교하여 나타내었다. 7월, 8월을 제외하면 저수량의 확률론적 예측 모형이 잘 맞는 것을 확인할 수 있는데, 7월과

8월의 차이는 홍수기 시 예비방류와 실제 유입량의 차이가 원인으로 판단된다. 이러한 차이는 모형에서 예측이 불가능한 영역이기는 하나, 가뭄 시 용수공급량의 변경 계획이 있다면 이를 모형에 반영할 수 있으므로 모형의 활용성은 유효하다 할 수 있다.

이와 같이 본 연구에서는 저수량의 확률론적 예측 모형을 이용하여 현재 저수량을 기준으로 향후 저수량의 확률적 변화를 시간의 변화에 따라 확인하였다. 현재 가뭄이 앞으로 미치는 영향에 대해서는 용수관리자뿐만 아니라 일반국민도 알고 싶은 정보로 그 효용성이 클 것으로 판단된다. 본 연구에서 검토한 바와 같이, 모형의 용수공급량을 조정하면 용수비축의 효과를 시간에 따라 나타낼 수 있어 용수공급 조정과 관련된 의사 결정에 도움이 될 것으로 판단된다.

### 3.3 용수관리 의사결정 지원 방안

가뭄 시에는 용수공급 조정 기준에 의해 댐공급량의 조정 기준이 있으나, 이의 효과를 명확하게 확인할 수 없으며, 목표로 하는 저수량을 달성하기 위해서는 어느 정도의 수량을 확보해야 하는지에 대한 정보도 필요하다. 용수공급 조정 기준의 효과는 Eq. (9)와 3.2절에서 언급된 방법을 통해 확인이 가능하며, 목표 시기의 목표 저수량을 달성하기 위해 필요한 수량은 Eq. (12)를 통해 산정할 수 있다. Fig. (9)는 6월 말의 정상 용수공급 환원단계(Level-0:  $31.3 \text{ 백만 m}^3$ )를 만족할 수 있는

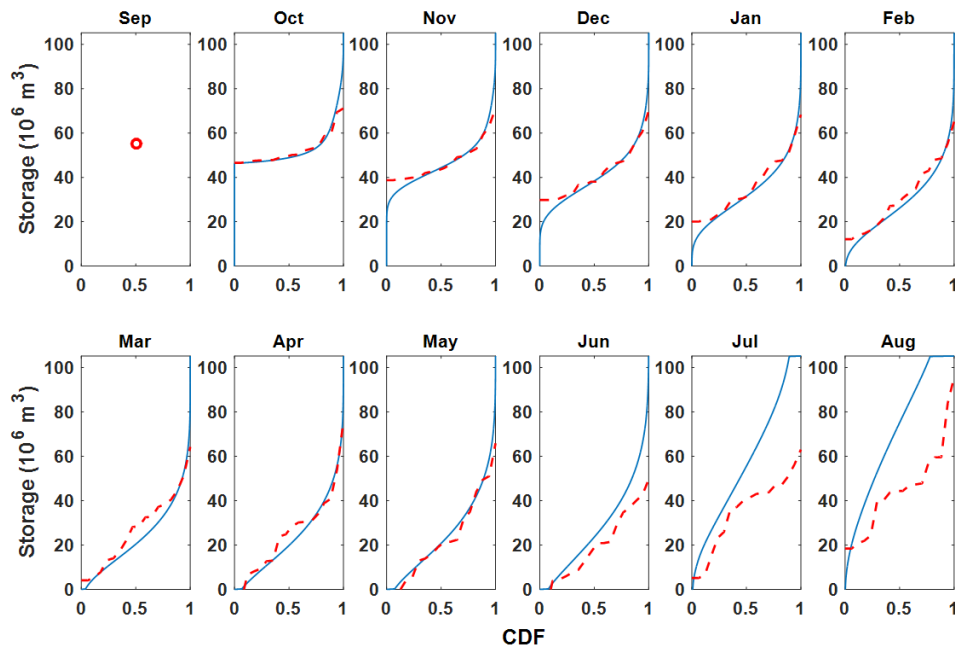


Fig. 8. Comparison between empirical CDF (dash line) and theoretical CDF (solid line). Initial storage (marker 'o'):  $55 \times 10^6 \text{ m}^3$  at the end of September

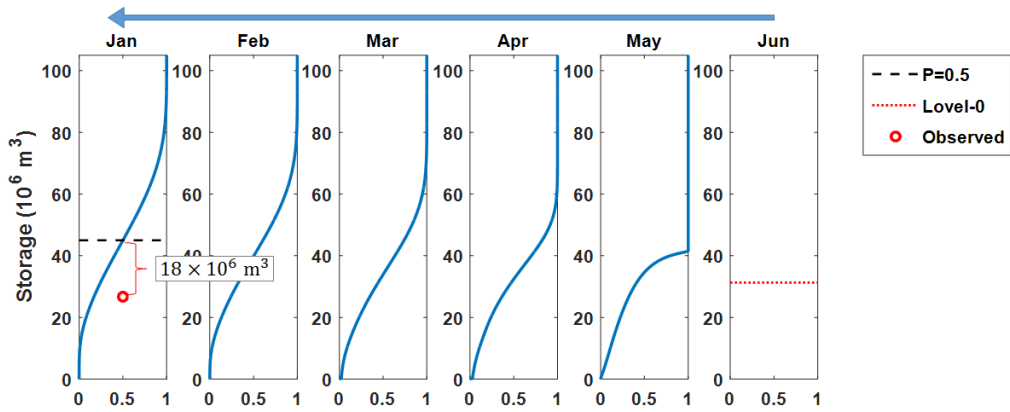


Fig. 9. Volume of water reserve for meeting the target storage. Target storage in June:  $31.3 \times 10^6 \text{ m}^3$

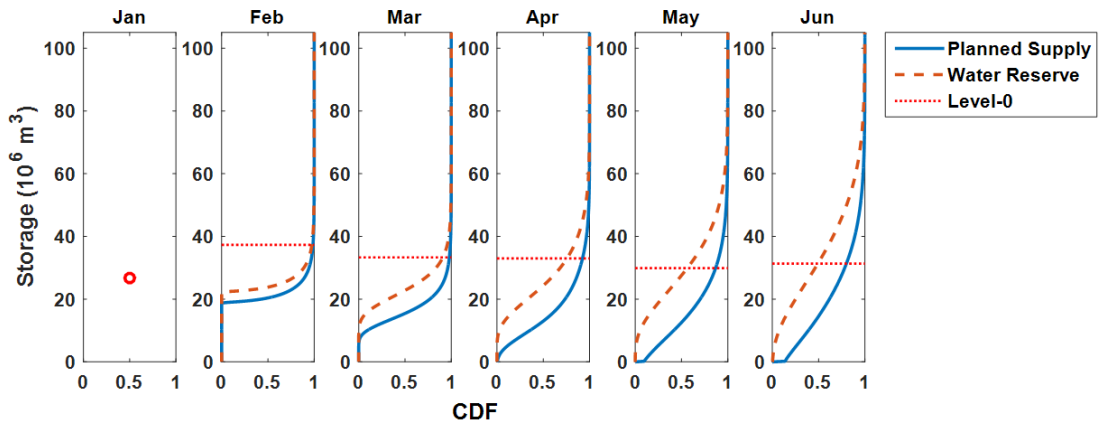


Fig. 10. Effect of water reserve. Initial storage (marker 'o'):  $26.62 \times 10^6 \text{ m}^3$

Table 2. Comparison of fail probability about planned supply and water reserve

	Feb	Mar	Apr	May	Jun
Planned Supply	0.986	0.985	0.927	0.868	0.800
Water Reserve	0.974	0.936	0.766	0.577	0.497

이전(5월부터 1월)의 저수량 확률을 나타내고 있다. 이를 토대로 6월 말의 정상용수공급 환원단계 저수량을 0.5의 확률로 만족할 2015년 1월 말의 저수량을 산정할 수 있고, 1월 말의 관측 저수량을 토대로 용수비축용량을 산정할 수 있다. 이와 같이 산정된 용량을 일 단위로 계산하면 12천  $\text{m}^3/\text{일}$ 의 용량으로 환산할 수 있으며, 이 용량을 비축할 경우 Fig. 10과 Table 2에 나타난 바와 같이 6월에는 정상용수공급 환원단계 저수량에 0.5의 확률로 도달할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 용수비축의 효과를 명확히 제시할 수 있어 용수관리 의사결정을 위한 도구로 활용성이 높을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 핵밀도함수를 이용하여 유입량의 불확실성을 고려한 저수량의 확률론적 예측 모형을 구축하고, 그 적용성과 활용성에 대해 보령댐을 대상으로 분석하였다. 분석 결과 본 연구에서 제안한 모형의 적용성이 높은 것으로 확인되었다.

저수량의 확률론적 예측 모형으로 현재의 저수량을 기준으로 시간의 변화에 따른 저수량을 확률적으로 예측할 수 있다. 특히 가뭄 시 저수량을 시간의 변화에 따라 예측하고, 직관

적으로 확인할 수 있어 증장기적인 용수관리에 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 용수관리를 위한 용수비축의 효과를 검토할 수 있으며, 이는 용수관리자뿐만 아니라 일반 국민들에게 가뭄의 상황과 향후 전망, 그리고 용수비축의 당위성에 대한 설명이 용이할 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 가뭄 시 용수비축량을 결정하기 위한 의사결정 방안으로 특정 시기에 목표저수량을 만족하기 위한 이전 저수량의 확률 계산이 가능하며, 이를 통해 목표저수량을 만족하는 확률별 비축량을 제시할 수 있다. 본 모형을 통해 계산된 비축량과 용수공급 조정 기준에 제시된 고정된 비축량을 함께 활용한다면, 가뭄 시 용수관리의 효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

추가적으로 현재 설정되어 있는 용수공급 조정 기준의 효과와 시기별 기준 저수량 변화의 합리성을 분석하여 현재 설정되어 있는 기준의 효율성을 향상시키는 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 국토교통부 물관리사업의 연구비지원(14AWMP-B082564-01)을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

Bowman, A. W., and Azzalini, A. (1997). *Applied smoothing techniques for data analysis: The kernel approach with*

*S-Plus illustrations*. OUP Oxford.

K-water (2013). *Operation manual of dam*. K-water.

K-water (2016). *White paper on drought*. K-water.

Lee, D.-R., Moon, J.-W., Lee, D.-H., and Ahn, J. H. (2006). "Development of water supply capacity index to monitor droughts in a reservoir." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 3, pp. 199-214.

McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration to time scales." *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Boston, MA, USA, Vol. 17, No. 22, pp. 179-183.

Palmer, W.C. (1965). *Meteorological drought* (Vol. 30). Washington, DC, USA: US Department of Commerce, Weather Bureau.

Park, M.J., Shin, H.J., Choi, Y.D., Park, J.Y., and Kim, S.J. (2011) "Development of a hydrological drought index considering water availability." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 53, No. 6, pp. 165-170.

Shafer, B.A., and Dezman, L.E. (1982). "Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas." *Proceedings of the Western Snow Conference*, Fort Collins, CO, Vol. 50, pp. 164-175.

Sheffield, J., Wood, E.F., and Roderick, M.L. (2012) "Little change in global drought over the past 60 years." *Nature*, Vol. 491, No. 7424, pp. 435-438.

Wand, M.P., and Jones, M.C. (1995). *Kernel smoothing*. Chapman & Hall, London.

WMO (2009). *Experts agree on a universal drought index to cope with climate risks*. WMO Press Release No. 872.