

## 우기 전후 댐 저수용량에 대한 이변량 빈도해석과 댐의 용수공급능력 평가

### Bivariate Frequency Analysis of Dam Storage Capacity before and after the Rainy Season and Evaluation on Water Supply Capacity

전 창 현\* / 유 철 상\*\* / 주 국 화\*\*\* / 이 광 만\*\*\*\*

Jun, Changhyun / Yoo, Chulsang / Zhu, Ju Hua / Lee, Gwang-Man

#### Abstract

This study proposes an evaluation method of water supply capacity of a dam, which uses the concept of return period by conducting bivariate frequency analysis of dam storage capacity. The proposed method was applied to the Daecheong Dam for the evaluation. Additionally, the return periods of Daecheong Dam were estimated for the representative drought events in Korea, whose results were also reviewed. Summarizing the results is as follows. First, this study evaluated several climatological factors related to the water supply capacity of dams in Korea to conduct the bivariate frequency analysis and selected the storage on May and the storage difference between June and October as variables for analysis. Second, as an evaluation result of the water supply capacity of the Daecheong Dam, it was found that the Daecheong Dam secures the water supply capacity under 20 years of return period. Finally, it was also confirmed that the proposed method in this study is valid to analyze and estimate the return period of representative drought events occurred in the Korean peninsula.

**keywords** : dam storage capacity, bivariate frequency analysis, water supply capacity, Daecheong dam

#### 요 지

본 연구에서는 댐 저수용량에 대한 이변량 빈도해석을 수행함으로써 재현기간 개념을 이용한 댐의 용수공급능력 평가방법을 제안하였다. 제안된 방법은 대청댐에 적용되어 검토되었다. 추가적으로 국내의 대표적인 가뭄사상에 대한 대청댐의 재현기간을 산정하고, 그 결과를 검토하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다. 먼저, 본 연구에서는 이변량 빈도해석을 수행하기 위해 한국의 기후 특성을 반영한 댐의 용수공급능력 평가인자를 고려하였으며 5월 저류량 및 6~10월의 저류량 차이를 대상 변량으로 결정하였다. 둘째, 재현기간의 개념을 이용하여 대청댐의 용수공급능력을 평가한 결과, 대청댐은 재현기간 20년 미만에 대한 용수공급능력을 확보하는 것으로 나타났다. 마지막으로, 본 연구에서 제안된 방법은 한반도에 발생했던 대표적인 가뭄사상들을 분석하고, 해당 사상들에 대한 재현기간을 산정하는데 있어서도 유효함을 확인하였다.

**핵심용어** : 댐 저수용량, 이변량 빈도해석, 용수공급능력, 대청댐

\* 홍콩과학기술대학교 공과대학 토목환경공학과 박사후연구원 (e-mail: luckys286@naver.com)

Post-doctoral Fellow, Department of Civil and Environmental Engineering, School of Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Kowloon, Hong Kong

\*\* 교신저자, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 교수 (e-mail: envchul@korea.ac.kr, Tel: 82-2-3290-3321)

*Corresponding Author*, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

\*\*\* 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 박사과정 (e-mail: khjoo1214@korea.ac.kr)

Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

\*\*\*\* K-water, K-water연구원 수석연구원 (e-mail: lkm@kwater.or.kr)

Principal Research Engineer, Korea Institute of Water & Environment, K-water, Daejeon 305-730, Korea

## 1. 서 론

우리나라는 연 강수량의 약 70%가 우기(6~9월)에 집중되기 때문에 효율적인 수자원 관리에 어려움이 있다. 즉, 우기를 제외한 기간에는 강수량이 부족하여 가뭄이 발생하기 쉬우므로 수자원 공급의 안정성을 확보하기 위한 많은 노력이 필요하게 된다. 이러한 노력 중 대표적인 것이 댐 등의 저수지를 이용한 수자원 확보이며 우리나라의 경우, 우기에 발생한 강수량의 상당 부분을 저수지에 저류하여 건기에 이를 활용하는 체계를 갖추고 있다. 현재 우리나라에는 약 18,000개의 댐 및 저수지가 있으며(K-water, 2005), 이 중 가장 중요한 역할을 수행하고 있는 시설물은 16개의 다목적 댐이다.

이러한 국내 다목적댐들은 수자원 시스템의 용수공급 정도를 파악하기 위해 이수안전도 혹은 안전채수량(safety degree for water shortage or safe yield)의 개념을 이용한다. 이는 용수요를 충족시킬 수 있는 공급의 안정성 정도를 평가하는 지표를 의미하며 공급 측면에서는 기준 갈수량, 공급신뢰도, 저수용량 등을 이용하고, 수요 측면에서는 용수공급 보장일수, 최소 부족량, 갈수 조정기간 및 용수부족에 따른 피해정도 등을 고려하게 된다(Lee, 2012).

일반적으로 수자원 시스템 평가자는 이행도 평가를 수행함에 있어 실패기간의 통계적 특성을 활용하는 것이 일반적이며 용수부족 발생빈도, 용수부족 지속기간 및 용수 부족량의 크기 등 크게 3가지 요소를 대상으로 용수공급의 안전성 정도를 평가하게 된다(Kjeldsen and Rosbjerg, 2004). 이는 수자원 시스템에 대한 수요를 만족시키는 정도인 신뢰도(reliability), 용수부족 발생 후 얼마나 빨리 만족조건으로 회복하는지와 관련된 회복도(resilience) 및 용수부족의 양적 크기를 나타내는 취약도(vulnerability) 등으로 정의된다. 이상과 같은 용수공급 안정성 지표 또는 이수안전도 평가지표는 Hashimoto et al. (1982)에 자세히 정의되어 있다.

과거 우리나라의 경우, 수문조사가 제대로 이루어지지 않아 댐과 같은 용수공급시설의 계획공급량을 결정하는데 이용 가능한 관측 자료가 제한적이었다. 따라서 댐 건설 당시의 사업 특성에 따라 이수안전도 기준을 다양하게 적용하였으며 지금까지 건설된 국내 댐들의 경우, 용수공급의 평가기준 중 보장공급량(firm supply)과 신뢰도 지표만을 적용하여 댐의 이수안전도를 평가하였다는 특징이 있다(Lee, 2012). 여기서, 보장공급량은 50년에서 100년의 특정 계획기간에 대한 용수공급체제로부터 통계적

으로 기대되어지는 일, 월, 또는 연 단위의 최소유량을 의미한다(Grigg, 1996).

이와 관련하여 Yi et al. (2012)은 우리나라에 대한 용수공급의 안정성을 정책적 혹은 기술적으로 판단할 수 있는 기준이 제시되어 있지 못하다는 특성으로부터 앞서 언급한 이수안전도 평가지표들에 대한 적용상의 문제점을 제기한 바 있다. 또한 이러한 문제점들을 개선하기 위한 방안 중 하나로 수문학적 지표로 정의될 수 있는 갈수빈도의 표준화 방안을 제안하고, 기존 지표들 간의 연계 가능성을 제시하였다. 이러한 갈수빈도는 수문사상이 가지고 있는 무작위성을 대표할 수 있기 때문에 모든 수계에 대해 일관된 기준으로 이수안전도를 평가할 수 있다는 특징이 있다.

결과적으로 수자원시스템의 용수공급능력 평가는 먼저, 갈수빈도 개념이 최소한의 기준으로 제시되고, 그 조건에서 신뢰도나 회복도 등과 같은 통계적 지표들과 물 부족에 따른 피해액 등이 반영된 Shortage Index (HEC, 1975), Generalized Shortage Index (Hsu, 1995) 및 Water Deficit Per Day (WARDEC, 1977) 등과 같은 경험적 지표들이 함께 고려됨으로써 이루어질 수 있다. 이러한 특성은 주로 수자원 시스템의 신규개발에 따른 계획이나 기존 댐을 취수원으로 하는 상수도 개발 계획, 기존 댐 취수에 대한 안전도 및 상수도 시설의 용수공급 안전도, 신규 댐을 취수원으로 하는 상수도 개발 계획, 신규 댐 안전도와 이에 따른 상수도 시설의 용수공급 안전도 및 이상가뭄에 대비한 갈수대책용량의 확보 등에 적용 가능하다.

본 연구에서는 갈수빈도의 개념을 적용하여 기존 댐의 용수공급능력을 파악하고, 댐 용수공급능력 평가 기준으로써 재현기간의 사용 가능성을 평가하고자 한다. 먼저, 국내·외에서 사용되고 있는 용수공급 평가지표들의 특성들을 제시하고, 그 문제점을 검토하였다. 이를 근거로 본 연구에서는 대청댐의 유입량 및 저류량 특성으로부터 댐 용수공급능력 평가인자를 결정하고, 재현기간에 따른 계획공급량 달성여부를 판단하기 위해 결정된 특성인자를 대상 변량으로 하는 이변량 빈도해석을 수행하였다. 추가로, 대청댐을 대상으로 국내의 대표적인 가뭄사상에 대한 재현기간을 산정함으로써 본 연구에서 제안한 댐 용수공급능력 평가방법의 적용성을 평가하였다.

## 2. 댐의 용수공급능력 평가

### 2.1 일반론

본 연구에서는 국내·외에서 대표적으로 적용되고 있는 이수안전도 평가지표인 보장공급량을 비롯하여 Hashimoto

et al. (1982)이 제안한 신뢰도, 회복도, 취약도의 일반적인 특성을 파악하고자 한다. 먼저, 보장공급량은 앞서 언급한 Grigg (1996)의 정의로부터 설명 가능하며 이는 저수지 운영기간 동안에 발생 가능한 가장 극심한 가뭄에 대해서도 하류에 용수공급이 가능한 유량을 의미한다(Kang, 2006). 이수안전도 기준으로 보장공급량을 적용한 댐들은 기록상의 최저 유량이 지속된 연도인 최대갈수년(1~2개년)만을 대상으로 물수지분석을 수행함으로써 대상 댐의 용수공급량을 결정하였다는 특징이 있다(Yi et al., 2012). 또한 Hashimoto et al. (1982)이 제안한 이수안전도 평가 지표는 용수공급의 실패가 발생한 사상을 대상으로 하기 때문에 Fig. 1에 제시된 기본 개념으로부터 설명 가능하다. 여기서,  $v(j)$ 는 용수공급 부족량,  $d(j)$ 는 용수공급 부족기간을 의미한다.

위험도와 신뢰도는 수자원 시스템의 이행도 평가를 위해 이용되어 온 가장 오래된 지표이며(Lee, 2012) 그 정의는 각각 다음 Eqs. (1) and (2)와 같다.

$$Rel_1 = P\{S \in NF\} \quad (1)$$

$$Rel_2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M d(j)}{T} \quad (2)$$

여기서,  $P$ 는 확률,  $S$ 는 수자원 시스템의 상태변수,  $NF$ 는 불만족 상태,  $M$ 은 용수공급 실패 사상의 수,  $T$ 는 시간단위의 전체 기간을 의미한다. 이 지표는 일정 기간을 대상으로 용수공급의 부족 또는 만족여부만을 발생확률로 평가하는 방법으로써 적용이 간단하고 편리하다는 장점이 있다. 그러나 용수부족사상에 대한 세부내용을 파악하는 데에는 어려움이 있으며 특히, 피해정도가 어느 정도인지

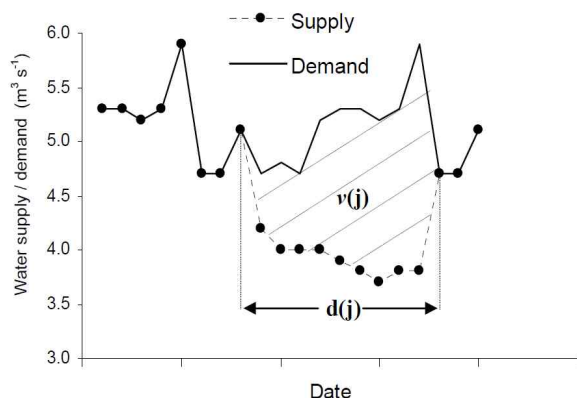


Fig. 1. Characteristics of Duration and Deficit Volume of a Failure Event (Kjeldsen and Rosbjerg, 2004)

에 대한 평가가 불가능하다는 한계가 있다.

회복도는 수자원 시스템이 불만족상태에 도달한 후, 얼마나 빨리 만족상태로 돌아오는지와 관련된 특성을 평가하는 지표이다. Hashimoto et al. (1982)에 의해 회복도 지표가 언급된 이후 많은 연구자들에 의해 유사한 형태의 지표들이 제안되었다(Fiering, 1982; Jinno et al., 1995; Kundzewicz and Laski, 1995; Vogel and Bolognese, 1995; Kundzewicz and Kindler, 1995; Srinivasan et al., 1999; Vogel et al., 1999). 대표적으로 평균 용수공급 부족기간 (Hashimoto et al., 1982)과 최대 용수공급 부족기간(Moy et al., 1986)을 고려한 회복도의 정의를 식으로 나타낸 결과는 다음 Eqs. (3) and (4)와 같다.

$$Res_1 = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d(j) \right\}^{-1} \quad (3)$$

$$Res_2 = \max_j [d(j)]^{-1} \quad (4)$$

취약도는 용수공급 실패 사상에 대한 용수부족 크기의 정도를 측정하는데 이용된다. 이는 장래 수문의 불확실성 및 수요의 변동성을 고려함으로써 용수공급의 안정성을 최대한으로 확보하는 것을 목적으로 한다. 총 부족량(Hashimoto et al., 1982)과 평균 부족량(Moy et al., 1986)을 고려한 취약도의 정의를 식으로 나타낸 결과는 다음 Eqs. (5) and (6)과 같다.

$$Vul_1 = \sum_{j \in F} h(j) \cdot e(j) \quad (5)$$

$$Vul_2 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M v(j) \quad (6)$$

여기서,  $h(j)$ 는 불만족 상태로 있는  $j$ 번째의 부족량,  $e(j)$ 는 불만족 상태에서의  $h(j)$ 에 대한 확률,  $e(1) = \dots = e(M) = 1/M$ 을 의미한다.

## 2.2 한국의 사례 및 문제점 검토

과거 우리나라의 경우, 댐과 같은 용수공급시설의 계획 공급량을 결정하는데 이용 가능한 관측 자료가 제한적이었다. 따라서 댐 건설 당시의 사업 특성에 따라 이수안전도 기준을 다양하게 적용하였으며 그 결과를 정리한 결과는 다음 Table 1과 같다.

지금까지 건설된 국내 댐들은 댐의 이수안전도를 평가하기 위해 용수공급능력 평가기준들 중 보장공급량과 신뢰도 등과 같은 두 가지 지표만을 적용하였다. 1970년대 까지 건설된 댐들의 경우, 관측된 수문 자료가 부족하여

Table 1. Application Example of Safety Degree for Water Shortage to Determine Water Supply in Korea (Lee, 2012)

Safety Degree for Water Shortage	Dams
Firm Supply	Andong Dam, Hapcheon Dam, Buan Dam, Yongdam Dam, Soyanggang Dam, Imha Dam(Validity), Hoengseong Dam, Boryeong Dam, Namgang Dam, Juam Dam
Reliability (more than 95%)	Chungju Dam, Bohyunsan Dam, Jangheung Dam, Hwabuk Dam, Buhang Dam, Hapcheon Dam, Seongdeok Dam
Reliability (more than 90%)	Miryang Dam, Hoengseong Dam, Imha Dam(Youngchon water canal), Daecheong Dam, Songriwon Dam

이전까지 기록된 최대갈수년(1967~1968년)의 유입 조건을 100% 보장하는 조건인 갈수기준년을 기준으로 이수안전도를 평가하였으며 1980년대 이후에는 20개년 내외에 해당하는 유입 조건을 100% 만족할 수 있는 보장공급량을 고려하여 그 능력을 평가하였다(Yi et al., 2012).

보장공급량 기준의 경우, 각각의 유역에 따라 한발이 발생한 연도가 다르기 때문에 갈수기준년이 유역마다 다양하게 나타나게 된다. 이는 모든 수계에 대해 일관된 기준을 적용하여 수자원시스템을 평가하기 어렵다는 특성을 반영한다. 또한 보장공급량 개념으로 댐을 운영할 경우, 이상가뭄과 같이 수자원 공급이 제한적일 때 수자원 이용의 변화에 따른 효율성을 보장하기 어렵다는 문제가 있다(Moy et al., 1986).

신뢰도 기준의 경우, 전체기간 대비 용수공급의 실패가 발생하지 않은 비율로 정의되기 때문에 용수공급의 실패가 용수부족 사상별로 어느 정도 지속되었고, 그 부족량의 크기는 어느 정도인지를 나타내는데 어려움이 있다. 즉, 이수안전도를 평가하는데 있어 신뢰도라는 단일 기준만을 적용하는 것은 실제 용수공급능력을 과대 혹은 과소평가할 수 있기 때문에 회복도와 취약도 개념을 추가적으로 고

려한 다기준 평가방법이 요구된다(Yi et al., 2012).

### 3. 이변량 빈도해석을 이용한 댐 용수공급능력 평가방법 개발

#### 3.1 댐 유입량 및 저류량 특성

우리나라는 장마와 태풍의 영향으로 세계 연 강수량(970 mm)의 약 1.3배에 해당하는 우리나라 연 강수량(1,274 mm) 중 2/3가 6월에서 9월 사이에 집중된다(MOCT, 2000). 참고로, 서울지점의 1961~2010년에 대한 연도별 총 강수량과 6월부터 9월까지의 누적 강수량을 비교하였으며 그 결과는 다음 Fig. 2와 같다.

그 결과, 6월에서 9월 사이에 집중되는 강수는 연도별로 차이가 있지만 평균적으로 연 강수량의 약 71%에 해당한다. 특히, 연 강수량이 2,000 mm 이상으로 나타난 1966년, 1990년, 1998년, 2003년 및 2010년의 경우, 총 강수량 중 6~9월에 집중된 강수량의 비율은 각각 81.88%, 78.00%, 83.50%, 77.94%, 및 80.11%인 것으로 나타났다.

이러한 한국의 기후 특성은 댐 용수공급의 특성인자인 댐의 유입량 및 저류량 특성에도 나타나게 된다. 대표적

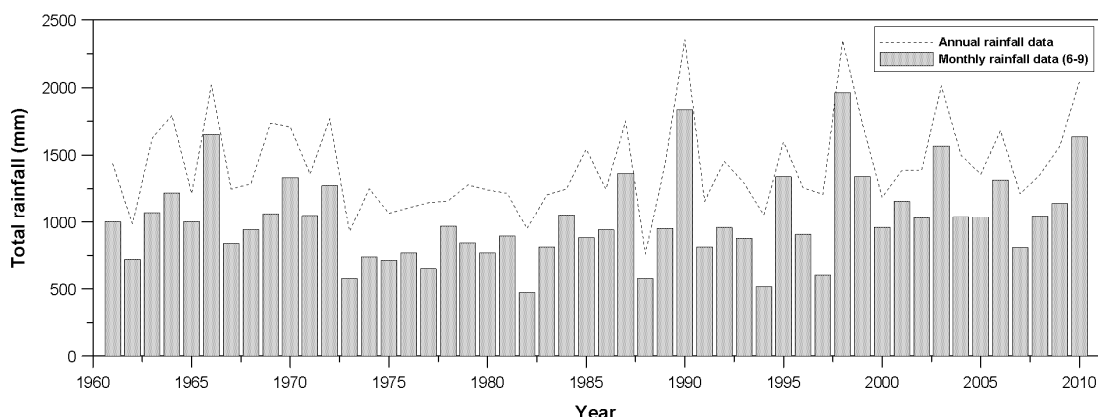


Fig. 2. Comparison Results of Time Series between Annual and Monthly Rainfall Data (June–September)

인 예로 1981년부터 2012년까지 관측된 대청댐의 월평균 댐 유입량 및 저류량에 대해 시계열을 작성한 결과는 다음 Fig. 3과 같다.

결과적으로 우리나라의 경우, 강우가 6월부터 9월 사이에 집중되기 때문에 댐 유입량이 여름철에 크게 증가하게 된다. 이에 따라 수위-저류량 관계곡선으로부터 산정된 저류량 역시 동일한 특성을 나타냄을 확인할 수 있다.

### 3.2 댐 용수공급능력 평가인자 결정

본 연구에서는 재현기간 개념을 이용하여 댐의 용수공급능력을 평가하기 위해 이변량 빈도해석을 수행하고자 한다. 이를 위해 3.1절에 제시된 댐 유입량 및 저류량의 시계열 분석 결과로부터 댐 용수공급능력 평가인자들을 결정하고, 이후 빈도해석을 수행하기 위한 확률변수로서 관련 인자들을 고려하고자 한다. 먼저, 댐 용수공급의 특성을 나타낼 수 있는 대상 변량을 선정하기 위해 매년 관측

된 댐 유입량 및 저류량 자료를 월단위로 나타냈으며 이를 정리한 결과는 다음 Fig. 4와 같다. 여기서, 유효저수용량(effective storage)은 댐의 총 저수용량에서 저수위(low water level, LWL) 아래의 저수량, 즉, 비활용용량(inactive storage)과 홍수조절용량을 제외한 저류량을 의미한다.

Fig. 4에 제시된 댐 유입량 및 저류량 특성은 이수측면에서 댐 운영을 하는데 있어 매년 계획공급량을 만족시킬 수 있는지에 대한 문제와 관련되어 있다. 즉, 특정 댐 유역에 여름철 강우가 충분히 내리지 않아 계획공급량을 충족시킬 수 없는 정도의 저류량을 갖게 된다면 다음 해 이수 목적의 수자원 이용에 문제가 발생할 수도 있다는 것이다.

본 연구에서는 우기(6~9월)에 집중되는 한국의 기후 특성과 계획공급량과 같은 이수측면에서의 댐운영 현황을 고려하여 5월 저류량( $S_5$ ), 6~9월 사이의 총 유입량( $\sum I$ ) 및 6월과 10월의 저류량 차이( $\Delta S$ )를 댐 용수공급능력

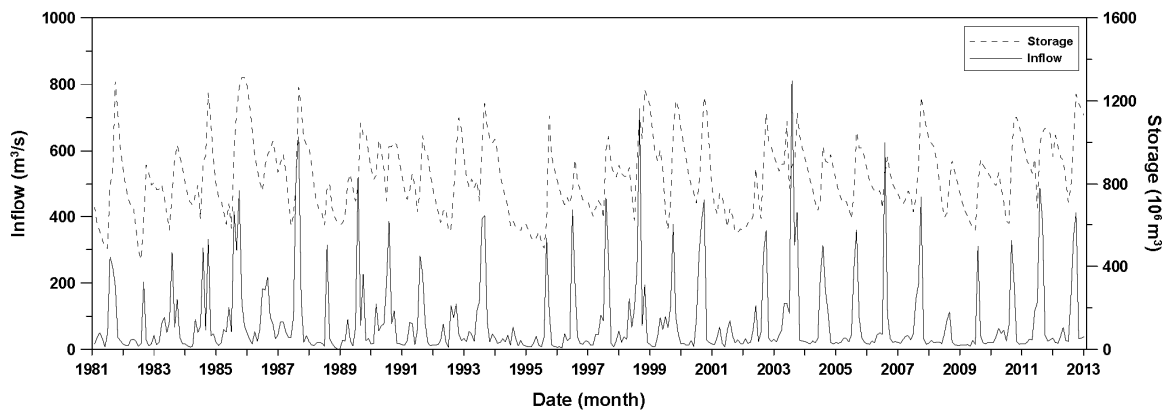


Fig. 3. Time Series of Inflow and Storage in Daechong Dam

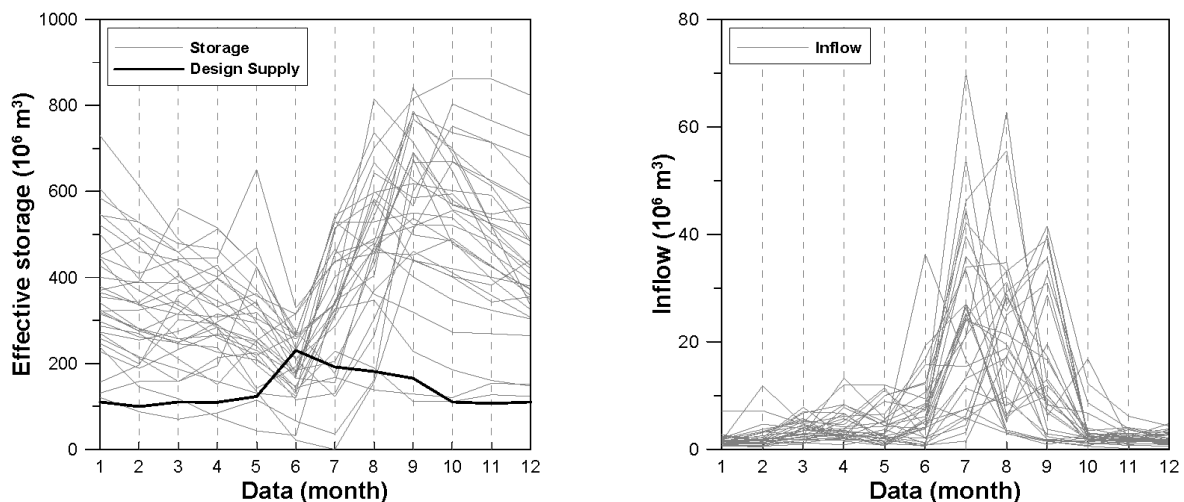


Fig. 4. Monthly Variation of Inflow and Storage in Daechong Dam (1981-2012)

평가인자로 선정하고, 그 관계를 검토하였다. 여기서,  $S_5$ 는 우기가 시작되기 직전인 5월 말의 저류량,  $\Delta S$ 는 6월 초(5월 말)와 10월 초(9월 말)에 해당하는 저류량의 차이를 의미한다. 먼저, 각 자료 간의 상관분석을 수행한 결과는 다음 Fig. 5와 같다.

Fig. 5에서 먼저 살펴볼 수 있는 것은 5월 저류량과 6월부터 9월까지의 유입량 사이의 상관 정도가 6~10월의 저류량 차이와의 상관 정도 보다 크다는 점이다(Figs. 5(a) and 5(b)). 두 경우에 대한 각각의 상관계수는 0.47 및 -0.06으로 산정되었으며 후자의 경우, 거의 0에 가깝게 나타났다. 이는 기본적으로 자연적인 유입량 보다는 댐 운영 특성이 반영된 저류량 차이에 해당하는 값들이 더욱 무작위한 특성을 나타내기 때문인 것으로 판단된다. 또한 Fig. 5(c)는 6~9월 사이의 유입량과 6~10월의 저류량 차이와의 상관관계를 나타낸 것으로, 두 자료를 대상으로 산정한 상관계수가 0.39라는 점에 주목할 필요가 있다. 이는 현재 상태의 저류량과 6~9월에 해당하는 유입량의 규모에 따라 홍수방어 또는 수자원확보를 위한 댐 운영이 이루어지며, 그 결과로 나타난 저류량의 변화는 결국 유입량과 직접적인 관계가 없어 보이는 값들로 변환된다는 것을 의미한다. 즉, 우기(6~9월) 동안의 유입량은 댐 운영에 따른 실제 댐의 저류특성을 적절히 반영하지 못할 수도 있다. 이러한 특성은 실제 댐의 저수용량을 이용하여 댐의 용수공급능력을 평가하는데 있어 6~9월 사이의

유입량을 댐의 용수공급능력 평가인자로 고려하기 어렵다는 것을 의미하기도 한다.

결과적으로 본 연구에서는 5월 저류량 및 6~10월의 저류량 차이를 댐 용수공급능력 특성인자로 결정하였다. 이들 인자의 통계적 특성을 정리한 결과는 다음 Table 2와 같다. 앞서 언급한 바와 같이 두 특성인자 간의 상관관계가 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 이는 이변량 빈도해석을 수행하는데 있어 두 변량 간의 관계가 독립이라고 가정할 수 있다는 것을 의미한다.

### 3.3 $S_5$ 와 $\Delta S$ 에 대한 이변량 빈도해석

본 연구에서 고려하고자 하는 이변량 빈도해석은 단변량 빈도해석과 비교했을 때, 수문특성들 간의 다양한 시나리오를 고려할 수 있다는 특징이 있으므로 수공구조물의 계획 및 설계 분야에 많이 적용되고 있다(Yue, 2000; 2001a; 2001b; Yue and Rasmussen, 2002; Zhang and Singh, 2006). 이변량 빈도해석 결과로 얻어지는 재현기간을 결합 재현기간(joint return period)이라고 하며 정의방법에 따라 다음의 두 가지로 구분된다. 먼저, 비동시 결합 재현기간(OR case joint return period),  $T_{X,Y}(x,y)$ 는  $X$ 와  $Y$  두 변량이 임계값  $x$ 와  $y$  둘 중 하나를 초과하거나 임계값  $x$ 와  $y$  모두를 초과했을 때의 재현기간을 의미하며, 동시 결합 재현기간(AND case joint return period),  $T'_{X,Y}(x,y)$ 는  $X$ 와  $Y$  두 변량이 임계값  $x$ 와  $y$  모두를 초과했을 때의

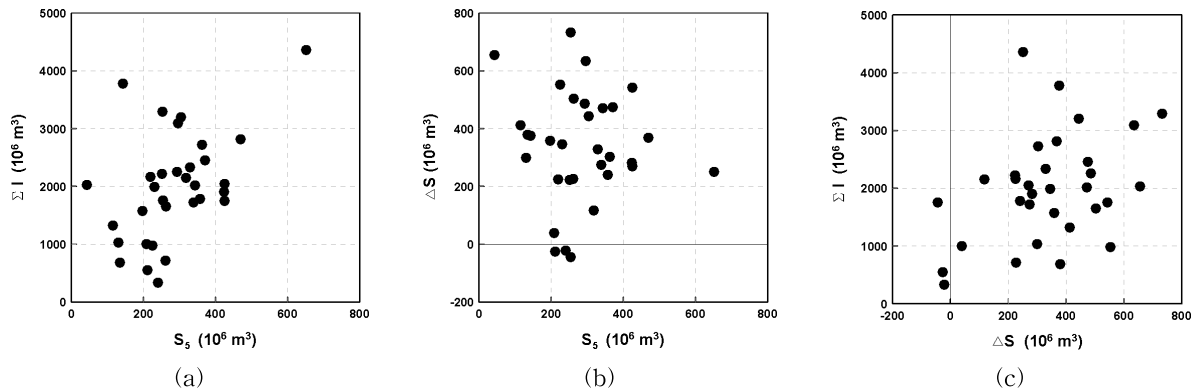


Fig. 5. Correlation Analysis about Object Variables on Daecheong Dam

Table 2. Statistical characteristics on  $S_5$  and  $\Delta S$  in Daecheong Dam

Statistics	$S_5$ (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	$\Delta S$ (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Average	283.74	335.13
Standard Deviation	119.87	193.08
Correlation Coefficient	-0.06	

재현기간을 의미한다(Yue and Rasmussen, 2002; Michele et al., 2005). 비동시 결합 재현기간 및 동시 결합 재현기간을 식으로 정리하면 다음 Eqs. (7) and (8)과 같다.

$$T_{X,Y}(x,y) = \frac{1}{1 - F_{X,Y}(x,y)} \quad (7)$$

$$T'_{X,Y}(x,y) = \frac{1}{F'_{X,Y}(x,y)} = \frac{1}{1 + F_{X,Y}(x,y) - F_X(x) - F_Y(y)} \quad (8)$$

여기서,  $F_X(x)$ 와  $F_Y(y)$ 는 각각 변량  $X$ 와  $Y$ 에 대한 주변누가확률분포이고,  $F_{X,Y}(x,y)$ 는 변량  $X$ 와  $Y$ 가 임계값  $x$ 와  $y$  보다 작거나 같은 경우에 대한 주변누가확률분포이다. 참고로, 기존의 단변량 빈도해석 결과를 통해 추정된 재현기간,  $T$ 와 앞서 언급한 결합 재현기간과의 크기 관계는  $T_{X,Y}(x,y) < T < T'_{X,Y}(x,y)$ 인 것으로 알려져 있다(Park, 2009).

일반적으로 이변량 빈도해석을 수행할 때, 비초과확률에 보다 충실한 개념인 비동시 결합 재현기간이 널리 사용된다. 그러나 본 연구에서와 같이 댐의 용수공급능력을 평가하고자 하는 문제는 극한 사상에 대한 고려가 필요하기 때문에 이러한 특성을 적극 반영할 수 있는 동시 결합 재현기간을 이용하는 것이 보다 적절하다. 특히, 본 연구에서 고려한 댐의 5월 저류량 및 6-10월 저류량 차이와 같이 독립적인 두 변량을 대상으로 이변량 빈도해석을 수행할 경우, 동시 결합 재현기간은 다음 Eq. (9)로부터 산정 가능하다. 결과적으로 독립적인 두 대상 자료에 적합한 확률분포형이 결정되면 위 식을 이용하여 간단히 이변량 빈도해석을 수행할 수 있다.

$$T'_{X,Y}(x,y) = \frac{1}{F'_{X,Y}(x,y)} = \frac{1}{F_X(x) \cdot F_Y(y)} \quad (9)$$

먼저, 5월 저류량의 경우, 대상 자료기간 동안 시점 및 종점에 해당하는 최솟값 및 최댓값이 명확하게 나타나는 특징이 있다. 이와 관련하여 상하 한계가 있는 다양한 자연현상을 설명하는데 많이 이용되어 온 베타분포의 적용성을 검토해 볼 수 있다. Pearson (1934)이 유도한 것으로 알려져 있는 베타분포는 기존에 수문학 분야에서도 토양이나 대수층 및 강설면적의 특성을 정량화하는데 사용되어 왔고(Beran and Sutcliffe, 1972; Cooke et al., 1995; Brubaker and Menoes, 2001; Ricciardi et al., 2005), 단위 유량도의 모형으로도 이용된 바 있다(Bhunya et al., 2004; 2007).

베타분포의 확률밀도함수는 다음 Eq. (10)과 같다.

$$f(x) = x^{\nu-1}(1-x)^{\omega-1}/B(\nu,\omega) \quad (10)$$

위 식에서

$$B(\nu,\omega) = \int_0^1 u^{\nu-1}(1-u)^{\omega-1} du \quad (11)$$

여기서,  $0 \leq x \leq 1$ 이고, 또한 두 형상 매개변수(shape parameter)는 모두 양의 값을 갖는다( $\nu > 0$ ,  $\omega > 0$ ). 아울러, 구간의 범위가  $a \leq x \leq b$ 로 나타나면 확률밀도함수는 다음 Eq. (11)로 표현 가능하다.

$$f(x) = \frac{(x-a)^{\nu-1}(b-x)^{\omega-1}}{B(\nu,\omega)(b-a)^{\nu+\omega-1}} \quad (12)$$

베타분포의 매개변수 추정은 모멘트법과 최우도법의 경우 모두에서 가능하다. 먼저, 모멘트법을 적용하면,

$$\nu = \bar{x} \{ [\bar{x}(1-\bar{x})/s^2] - 1 \} \quad (13)$$

$$\omega = (1-\bar{x}) \{ [\bar{x}(1-\bar{x})/s^2] - 1 \} \quad (14)$$

여기서,  $\bar{x}$ 와  $s$ 는 각각 대상 자료의 평균 및 표준편차를 의미한다. 또한 최우도법을 적용하는 경우에는 아래 두 식을 동시에 만족하는 값으로부터 매개변수가 결정된다. 즉,

$$\psi(\hat{\nu}) - \psi(\hat{\nu} + \hat{\omega}) = n^{-1} \sum_{i=1}^n \log x_i \quad (15)$$

$$\psi(\hat{\omega}) - \psi(\hat{\nu} + \hat{\omega}) = n^{-1} \sum_{i=1}^n (1 - \log x_i) \quad (16)$$

위 식에서  $\psi$ 는 di-gamma 함수로 다음과 같이 정의된다.

$$\psi(c) = \frac{d}{dc} [\log \Gamma(c)] = \frac{d\Gamma(c)/dc}{\Gamma(c)} \quad (17)$$

이상과 같은 베타분포의 특성을 이용하여 댐의 저류량 특성을 정량화한다는 것은 먼저 해당 매개변수들을 적절히 추정하는 문제를 포함하게 된다. 본 연구에서는 대청댐의 5월 저류량 자료에 대한 베타분포의 매개변수를 추정하기 위해 모멘트법을 적용하였으며 그 결과,  $\nu$ 는 2.76,  $\omega$ 는 3.67로 나타남을 확인하였다.

또한 6~10월 저류량 차이의 경우, 자료들이 평균값 주위에 집중되어 있고, 경우에 따라 음수가 발생하며 상하한 경계가 불분명하다는 특징이 있으므로 본 연구에서는 정규분포를 이용하여 대상 자료를 정량화하고자 하였다. 이 경우, Table 2에 제시된 대상 자료의 평균( $\mu=335.13$ ) 및 표준편차( $\sigma=193.08$ )가 바로 정규분포의 매개변수가 되기 때문에 다음 Eq. (18)과 같은 확률밀도함수를 결정할

수 있다.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (18)$$

이변량 빈도해석에 적용되는 두 대상 자료의 특성을 반영한 각각의 확률밀도함수와 상대도수분포표를 비교한 결과는 다음 Fig. 6과 같다. 추가로, 본 연구에서는 대상 자료에 적용한 확률분포형의 적합도를 검증하기 위해  $\chi^2$ -검정을 이용하였으며, 대청댐의 5월 저류량( $\chi^2=3.97$ ) 및 6~10월 저류량 차이( $\chi^2=1.28$ )에 대한 적용결과 모두 95% 신뢰구간 내에서 유의한 것으로 나타났다.

실제로 본 연구에서와 같이 서로 독립이라고 가정할 수 있는 두 변량을 대상으로 이변량 빈도해석을 수행하는데 있어 동시 결합 재현기간에 따른 대상 변량들의 특성을 파악하기 위한 조합의 수는 무한하다. 따라서 본 연구에서는 10, 30, 50, 70, 90%의 발생확률에 대해 임의로 5월 저류량을 선택하고, 주어진 재현기간을 만족하는 6~10월

저류량 차이를 결정하는 방법과 임의로 6~10월 저류량 차이를 선택하고, 주어진 재현기간을 만족하는 5월 저류량을 결정하는 방법을 고려하였다. 앞서 각각의 용수공급능력 평가인자들에 대한 확률밀도함수를 결정하였으므로 임의의 발생확률을 갖는 해당 인자들의 임계값을 산정할 수 있다. 이는 Eq. (9)로부터 특정 재현기간에 대한 평가인자들의 저류특성을 파악하는데 이용 가능하다. 본 연구에서 고려한 용수공급능력 평가인자들 중 먼저, 5월 저류량을 임의로 선택한 경우와 6~10월 저류량 차이를 임의로 선택한 경우에 대한 빈도해석 결과는 각각 다음 Tables 3 and 4와 같다.

#### 4. 재현기간의 개념을 이용한 대청댐의 용수공급능력 평가

##### 4.1 대청댐의 용수공급능력 평가

앞 절에서는 댐의 저류량 특성(5월 저류량 및 6~10월

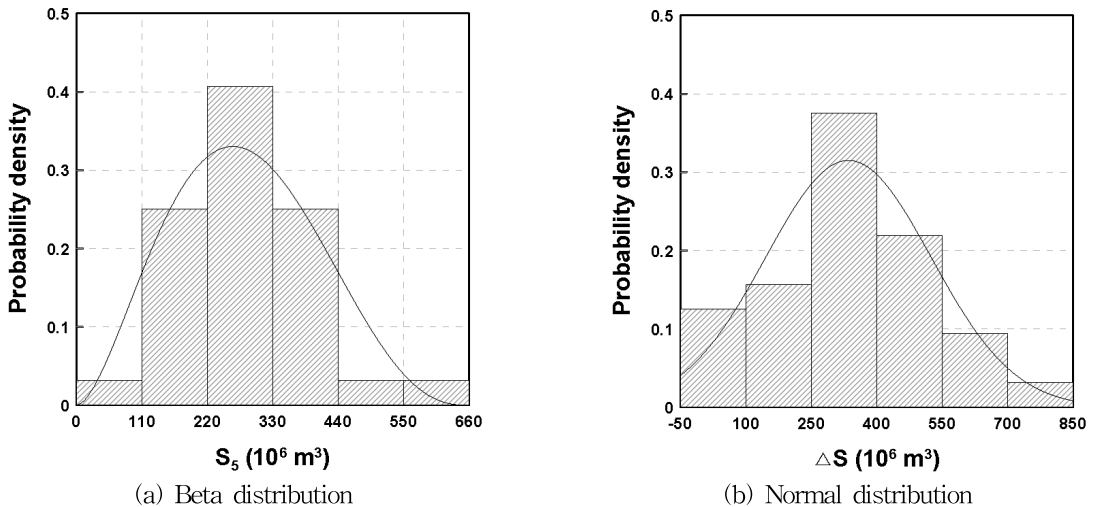


Fig. 6. Application Results of Probability Distribution for the Relative Frequency of Random Variables (left: storage on May, right: storage between 6 & 10)

Table 3. Storage between 6 & 10 Followed by Return Periods at Fixed Storage on May in Daechong Dam

%	$S_5$ ( $10^6$ m <sup>3</sup> )	$\Delta S$ by return periods ( $10^6$ m <sup>3</sup> )				
		10 years	20 years	30 years	50 years	100 years
10	127.50	1047.58	335.13	251.96	172.60	87.67
30	211.02	251.96	148.36	99.48	45.32	-18.94
50	278.67	172.60	87.67	45.32	-2.97	-61.45
70	349.50	129.00	52.24	12.92	-32.13	-87.78
90	447.55	99.48	27.53	-9.66	-52.88	-106.30



Table 4. Storage on May Followed by Return Periods at Fixed Storage between 6 & 10 in Daecheong Dam

%	$\Delta S$ ( $10^6 \text{ m}^3$ )	$S_5$ by return periods ( $10^6 \text{ m}^3$ )				
		10 years	20 years	30 years	50 years	100 years
10	87.69	660.00	278.67	222.66	173.53	127.50
30	233.88	222.66	159.61	133.41	107.47	81.07
50	335.13	173.53	127.50	107.47	87.22	66.25
70	436.38	148.94	110.60	93.60	76.25	58.12
90	582.56	133.41	99.68	84.57	69.05	52.74

저류량 차이)을 고려한 이번량 빈도해석을 수행하였으며 각 대상 변량의 발생확률에 따른 재현기간별 변화특성을 검토하였다. 이를 근거로 댐의 용수공급능력을 평가하기 위해 본 절에서는 해당 댐의 계획공급량을 만족시키기 위한 재현기간이 어느 정도로 나타나게 되는지를 파악하고자 한다. 이를 위해서는 먼저, 매년 다양한 형태로 나타나는 저류량 변화의 변동성 정도를 일관되게 표현할 수 있는지에 대한 평가가 필요하다.

대부분의 국내 댐들은 우기를 제외한 나머지 기간 동안 댐 공급량이 거의 일정하게 유지된다. 따라서 전년도 10월부터 당해연도 5월까지의 저류량 변화는 선형적으로 표현할 수 있으며, 그 기울기는 해당 기간 동안 감소하는 형태로 나타나게 된다. 본 연구에서 고려한 대청댐에 대한 결과는 다음 Fig. 7과 같다. 이 때 저류량 변화를 나타내는 대표 직선의 기울기는 매년 10월과 5월에 대한 평균 저류량의 차이를 이용하여 결정하였다.

또한 6월과 10월 사이의 저류량 차이도 마찬가지로 해당 기간 동안 선형적으로 증가한다고 가정하였다. 이는 재현기간 개념을 이용하여 이수안전도를 평가한다는 측면에서 계획공급량을 만족시키지 못하는 시점이 언제이고, 그 크기가 어느 정도로 나타나는지에 대한 특성들을 파악하는데 있어서는 무리가 없어 보인다. 이를 근거로 본 연구에서는 대청댐에 대한 재현기간별 저류량 변화에 따른 계획공급량 달성여부를 평가하였다.

대표적인 예로 5월 저류량의 발생확률이 30%인 경우, 재현기간 50년에 대한 대청댐의 계획공급량 달성여부를 평가하는 방법을 정리하면 다음과 같다. 먼저, 재현기간에 따른 저류량 변화 특성을 파악하기 위해 대상 변량인 5월 저류량을 나타내는 베타분포의 확률밀도함수로부터 발생 확률 30%에 해당하는 저류량( $211.02 \times 10^6 \text{ m}^3$ )을 시점으로 선정한다. 그 후 6월부터 10월까지의 저류량은 재현기간 50년에 대한 6~10월 저류량 차이( $45.32 \times 10^6 \text{ m}^3$ )만큼 선형적으로 증가하게 되는데 이는 Eq. (9)로부터 결정된다. 마

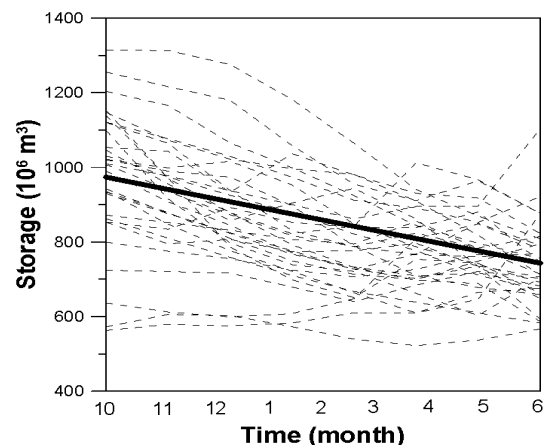
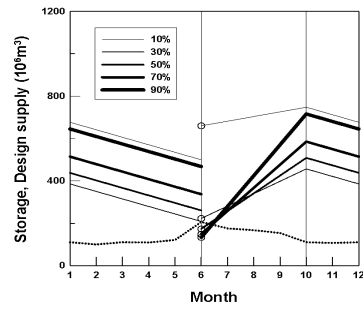
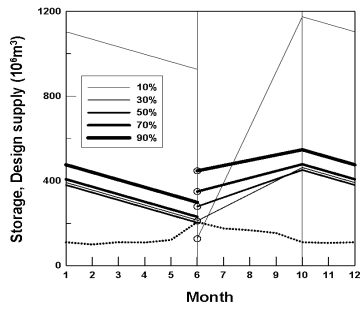


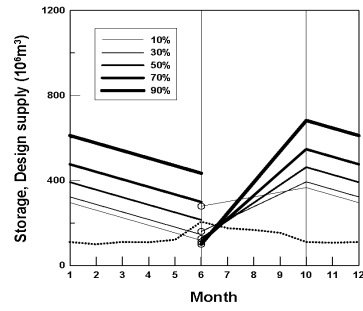
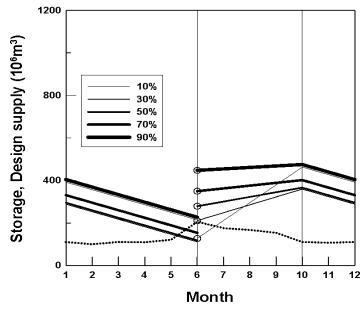
Fig. 7. Representative Straight Line of Decrease for Storage from October to May in Daecheong Dam

지막으로 10월부터 다음해 5월까지의 저류량 변화 특성은 Fig. 7로 대표되는 직선의 기울기를 일정하게 적용하여 선형적으로 감소하도록 나타낸다. 이러한 방법을 적용하여 다양한 발생확률에 대한 재현기간별 저류량 변화 특성을 나타낼 수 있으며 어느 경우에 대한 저류량의 크기가 계획공급량보다 작게 나타나는지에 대한 여부를 판단함으로써 대상 댐의 용수공급능력을 평가할 수 있다. 이는 6~10월 저류량 차이에 대한 발생확률을 우선적으로 고려하는 경우에도 동일하게 적용된다. 본 연구에서는 5월 저류량 및 6~10월 저류량 차이 각각에 대해 10, 30, 50, 70, 90%의 발생확률에 따른 재현기간별(10, 20, 30, 50 100년) 저류량 변화 특성을 나타내고, 계획공급량 달성여부를 판단함으로써 대청댐의 용수공급능력을 평가하였다. 그 결과를 정리하면 다음 Fig. 8과 같다.

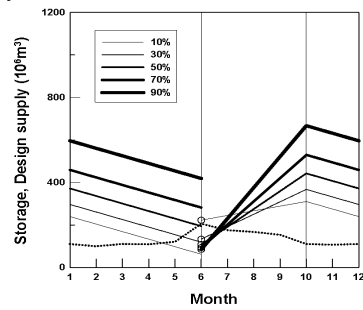
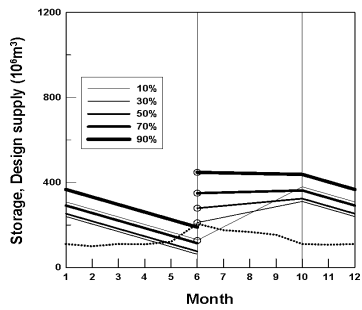
그 결과, 대청댐의 경우, 임의로 선택한 변량이 5월 저류량인지 6~10월 저류량 차이인지에 관계없이 재현기간 20년 미만에 대한 용수공급능력을 확보하는 것으로 나타났다. 추가로, 본 연구에서는 빈도해석 결과의 적절성 여부를 판단하기 위해 실제 관측 자료로부터 나타난 계획용



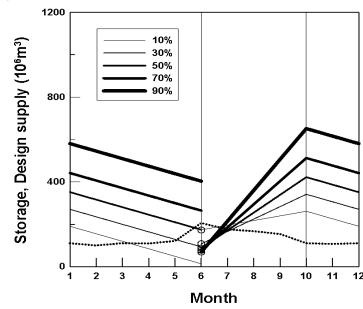
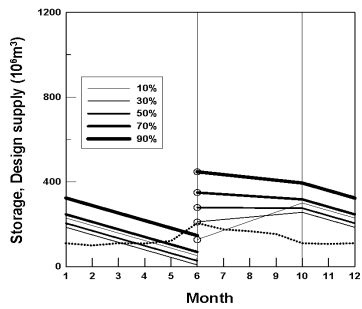
(a) Return period : 10 years



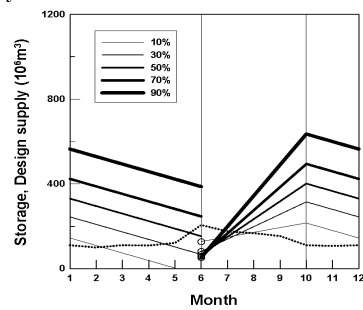
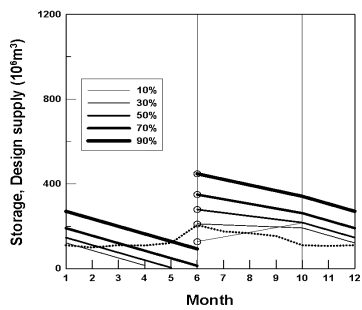
(b) Return period : 20 years



(c) Return period : 30 years



(d) Return period : 50 years



(e) Return period : 100 years

Fig. 8. Variation on Storage Followed by Return Periods with Design Supply (left : fixed storage on May, right : fixed storage between 6 & 10)

수공급 미달성 빈도를 파악하였다. 대청댐의 계획용수공급 미달성 빈도는 대상 기간인 32년(1981~2012) 동안 연 단위 및 월 단위에 대해 각각 9회(28.1%), 12회(3.1%)인 것으로 나타났다. 이러한 결과는 대청댐의 유효저수용량에 비해 계획공급량이 상대적으로 크게 산정되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4.2 주요 가뭄사상 분석

본 연구에서는 국내의 대표적인 가뭄년도(1988~1989년, 2001~2002년)에 관측된 실제 5월 저류량 및 6~10월 저류량 차이를 대상 변량으로 하는 이변량 빈도해석을 수행하였다. 이러한 결과는 해당 년도의 실제 댐 저류량 특성이 계획공급량을 어느 정도 만족시킬 수 있는지를 파악하는데 이용될 수 있다. 대표적인 가뭄년도에 나타난 대청댐의 저류특성으로부터 각각의 가뭄사상들에 해당하는 재현기간을 산정한 결과는 다음 Table 5와 같다. 각각의 재현기간은 대청댐 자체의 용수공급능력(재현기간 20년 미만)과 비교했을 때 상대적으로 크게 산정되었으며 이러한 결과는 가뭄기간 동안 대청댐의 용수공급에 문제가 발생할 수도 있다는 특성을 반영하게 된다.

이와 관련하여 본 연구에서 제안한 용수공급능력 평가 방법은 당해의 5월 저류량에 해당하는 발생확률로부터 재

현기간별 저류량 변화 특성을 파악할 수 있기 때문에 Table 5에 제시된 결과들에 대한 평가가 가능하다. 본 연구에서 고려한 대청댐을 대상으로 재현기간별 저류량 변화 특성을 해당 년도의 실제 저류량 및 계획공급량과 함께 나타낸 결과는 다음 Fig. 9와 같다.

본 연구에서는 재현기간 50년 및 100년에 대한 저류량 변화 특성을 실제 저류량과 비교해 봄으로써 주요 가뭄사상에 대한 재현기간 산정 결과의 적절성 여부를 평가하였다. 그 결과, 대상 가뭄기간 각각에 대한  $S_5$ 는 거의 유사하게 나타나기 때문에 6~10월 저류량 차이에 해당하는  $\Delta S$ 가 재현기간을 산정하는데 있어 중요한 인자임을 확인할 수 있다. 이는 결과적으로 댐 유역 내 여름철 강우가 충분히 내리지 않아 계획공급량을 충족시킬 수 없을 정도의 저류량을 갖게 될수록 가뭄사상에 대한 재현기간이 크게 산정된다는 특성을 반영한다.

본 연구에서 제안한 댐의 용수공급능력 평가방법은 당해의 10월부터 다음 해 6월까지의 저류량이 일정한 기율기로 감소한다고 가정하였으므로 Fig. 9와 같이 다음 해의 실제 저류량이 증가하는 특성을 반영하지 못한다. 그러나 이러한 특성은 다음 해 5월 말 저류량 및 6월 초 저류량에 반영되는 것으로 본 연구에서와 같이 당해의 저류량 변화(6~10월 저류량 차이)에 따른 다음 해의 계획공

Table 5. Return Period (yr) of Representative Drought Events in Korea

Dam	Representative Drought Event	
	1988-1989	2001-2002
Daecheong	50-100	more than 100

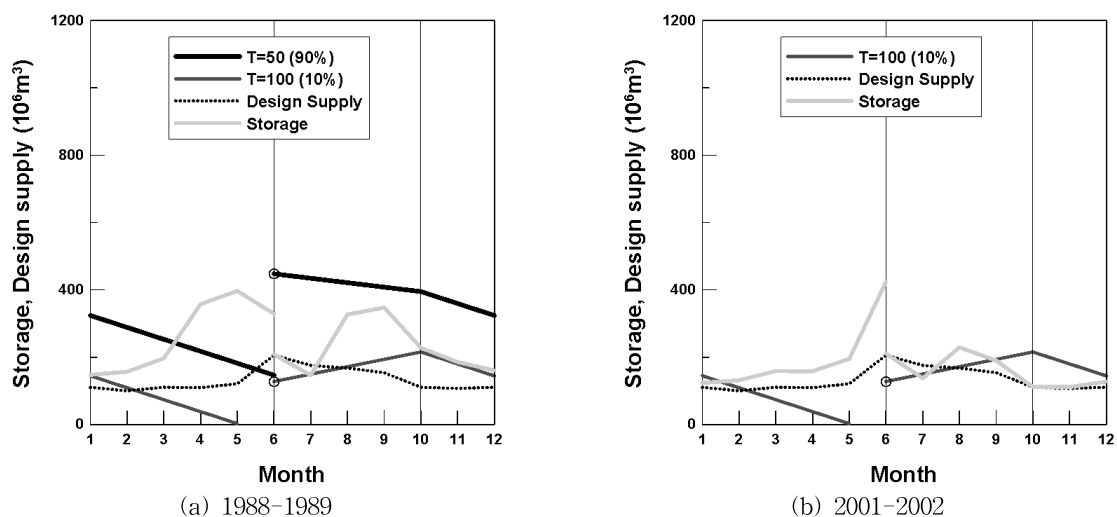


Fig. 9. Variation on Storage and Design Supply Followed by Return Period of Representative Drought Events in Korea

급량 달성 여부를 평가하는데 있어서는 무리가 없어 보인다. 결과적으로 본 연구에서 제안한 용수공급능력 평가방법을 이용하여 가뭄사상에 대한 재현기간을 간접적으로 파악할 수 있었으며 그 결과는 가뭄년도의 실제 저류량을 대상으로 수행한 이변량 빈도해석 결과와 유사하게 나타났다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 갈수빈도의 개념을 이용한 댐 용수공급능력 평가방법을 제안하였다. 제안된 방법은 대청댐에 적용되어 검토되었다. 먼저, 국내·외에서 대표적으로 적용되고 있는 용수공급 평가지표들의 특성들을 제시하고, 그 문제점을 검토하였다. 이를 근거로 본 연구에서는 대청댐의 유입량 및 저류량 특성으로부터 댐 용수공급능력 평가인자를 결정하고, 재현기간에 따른 계획공급량 달성여부를 판단하기 위해 결정된 특성인자를 대상 변량으로 하는 이변량 빈도해석을 수행하였다. 추가로, 국내의 대표적인 가뭄사상에 대한 대청댐의 재현기간을 산정함으로써 본 연구에서 제안한 댐 용수공급능력 평가방법의 적용성을 평가하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

먼저, 본 연구에서는 이변량 빈도해석을 수행하기 위해 댐 유입량 및 저류량의 시계열 분석 결과로부터 댐 용수공급능력 평가인자들을 결정하였다. 이는 이수측면에서 댐 운영을 하는데 있어 매년 계획공급량을 만족시키는데 대한 문제와 관련되어 있으며, 본 연구에서는 우기(6~9월)에 집중되는 한국의 기후 특성을 고려하여 5월 저류량 및 6~10월의 저류량 차이를 대상 변량으로 결정하였다. 이들 인자의 통계적 특성을 검토한 결과, 두 특성인자 간의 상관관계가 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있었다.

이를 근거로 본 연구에서는 대청댐에 대한 재현기간별(10, 20, 30, 50, 100년) 저류량 변화에 따른 계획공급량 달성여부를 평가하였다. 본 연구에서 고려한 대상 변량들의 10, 30, 50, 70, 90%에 해당하는 발생확률을 고려하여 이변량 빈도해석을 수행하였으며 그 결과, 대청댐은 재현기간 20년 미만에 대한 용수공급능력을 확보하는 것으로 나타났다. 이는 대청댐의 유효저수용량에 비해 계획공급량이 상대적으로 크게 산정되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 결과적으로 본 연구에서 제안한 방법은 대상 댐의 실제 저류특성을 반영하여 이변량 빈도해석을 수행하고, 그 결과로부터 계획공급량 달성여부를 판단하는 것이기 때문에 국내·외 댐들의 저류량 및 계획공급량 자료만 가용하다면 재현기간 개념을 이용한 각 댐들의 용수공급능력 평가가 가능할 것으로 판단된다.

추가로, 국내의 대표적인 가뭄 년도(1988~1989년, 2001~2002년)에 대한 대청댐의 실제 저류량 특성을 대상 변량으로 하여 이변량 빈도해석을 수행하였으며 그 결과, 재현기간이 50~100년 또는 100년 이상인 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 제안한 댐의 용수공급능력 평가방법으로부터 결정된 가뭄사상의 재현기간과 유사한 결과이다. 각각의 재현기간은 대청댐 자체의 용수공급능력(재현기간 20년 미만)과 비교했을 때 상대적으로 크게 산정되었으며 이러한 결과는 가뭄기간 동안 대청댐의 용수공급에 문제가 발생할 수도 있다는 특성을 반영하게 된다.

## 감사의 글

본 연구는 2013년도 K-water의 재원으로 한국수자원학회의 지원을 받아 수행된 사업(갈수빈도 표준화 및 물부족지표 개발을 통한 용수공급 평가방법 개선 연구)의 일부입니다. 연구지원에 감사드립니다.

## References

- Beran, M.A., and Sutcliffe, J.V. (1972). "An index of flood-producing rainfall based on rainfall and soil moisture deficit." *Journal of Hydrology*, Vol. 17, pp. 229-236.
- Bhunya, P.K., Berndtsson, R., Ojha, C.S.P., and Mishra, S.K. (2007). "Suitability of Gamma, Chi-square, Weibull, and Beta distributions as synthetic unit hydrographs." *Journal of Hydrology*, Vol. 334, pp. 28-38.
- Bhunya, P.K., Mishra, S.K., Ojha, C.S.P., and Berndtsson, R. (2004). "Parameter estimation of beta distribution for unit hydrograph derivation." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 9, No. 4, pp. 325-332.
- Brubaker, K.L., and Menoes, M. (2001). "A technique to estimate snow depletion curves from time-series data using the beta distribution." *Proceedings of the Eastern Snow Conference*, Vol. 58, pp. 343-346.
- Cooke, R.A., Mostaghimi, S., and Woeste, F. (1995). "Effect of hydraulic conductivity probability distribution function on simulated solute leaching." *Water Environment Research*, Vol. 67, No. 2, pp. 159-168.
- Fiering, M.B. (1982). "Alternative indices of resilience." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 33-39.
- Grigg, N.S. (1996). *Water resources management* :

- principles, regulation, and cases.* McGraw-Hill.
- 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, pp. 14-20.
- Hsu, S-K. (1995). "Shortage indices for water-resources planning in Taiwan." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 121, No. 2, pp. 119-131.
- Hydrologic Engineering Center (HEC). (1975). "Hydrologic engineering methods for water resources development: Vol. 8, Reservoir Yield." US Army Corps of Engineers, Davis, CA.
- Jinno, K., Zongxue, X, Kawamura, A., and Tajiri, K. (1995). "Risk assessment of a water supply system during drought." *International Journal of Water Resources Development*, Vol. 11, No. 2, pp. 185-204.
- Kang, T-U. (2006). *Evaluation and comparison of reservoir yields from Chungju multipurpose dam by HEC-5 model and an nonlinear programming.* M.S. thesis, Pukyong National University.
- Kjeldsen, T.R., and Rosbjerg, D. (2004). "Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 49, No. 5, pp. 755-767.
- Kundzewicz, Z.W., and Kindler, J. (1995). "Multiple criteria for evaluation of reliability aspects of water resources systems." In: *Modelling and Management of Sustainable Basin-scale Water Resource Systems* (Proceedings of a Boulder Symposium), IAHS Publ., No. 231, pp. 217-224.
- Kundzewicz, Z.W., and Laski, A. (1995). "Reliability-related criteria in water supply studies." In: *New Uncertainties Concepts in Hydrology and Water Resources*, Cambridge University Press, pp. 299-305.
- K-water. (2005). *Introduction to Dams in Korea.*
- Lee, G-M. (2012). "On the water yield assessment index in water resources system." *Magazine of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 8, pp. 71-77.
- Michele, C.D., Salvadori, G., Canossi, M., Petaccia, A., and Rosso, R. (2005). "Bivariate statistical approach to check adequacy of dam spillway." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 10, No. 1, pp. 50-57.
- Ministry of Construction & Transportation (MOCT). (2000). *Mid/Long-Term Planning for Flood Control Project.*
- Moy, W-S., Cohon, J.L., and ReVelle, C.S. (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.
- Park, M. (2009). *Probabilistic occurrence characteristics and climatic variabilities of extreme storm events.* Ph.D. dissertation, Korea University.
- Pearson, K. (1934). *Tables of the Incomplete Beta-Function.* Biometrika Office, University College, London.
- Ricciardi, K.L., Pinder, G.F., and Belitz, K. (2005). "Comparison of the log-normal and beta distribution functions to describe the uncertainty in permeability." *Journal of Hydrology*, Vol. 313, pp. 248-256.
- Srinivasan, K., Neelakantan, T.R., Shyam Narayan, P., and Nagarajukumar, C. (1999). "Mixed-integer programming model for reservoir performance optimization." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 125, No. 5, pp. 298-301.
- Vogel, R.M., and Bolognese, R.A. (1995). "Storage-reliability-resilience-yield relations for over-year water supply systems." *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 3, pp. 645-654.
- Vogel, R.M., Lane, M., Ravindran, R.S., and Kirshen, P. (1999). "Storage reservoir behaviour in the United States." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 125, No. 5, pp. 245-254.
- Water Resources Development Public Corporation (WARDEC). (1977). "Drought assessment." *Mizu To Tomoni*, No. 159, Tokyo, Japan, pp. 8.
- Yi, J., Lee, G-M., and Cha, K-U. (2012). "Idea on the improvement of water yield evaluation methodology." *Magazine of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 12, pp. 51-57.
- Yue, S. (2000). "The gumbel mixed model applied to storm frequency analysis." *Water Resource Management*, Vol. 14, pp. 377-389.
- Yue, S. (2001a). "A bivariate gamma distribution for use

in multivariate flood frequency analysis." *Hydrological Processes*, Vol. 15, pp. 1033-1045.

Yue, S. (2001b). "The gumbel logistic model for representing a multivariate storm event." *Advances in Water Resources*, Vol. 24, pp. 179-185.

Yue, S., and Rasmussen, P. (2002). "Bivariate frequency analysis: discussion of some useful concepts in hydrological application." *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 2881-2898.

Zhang, L., and Singh, V.P. (2006). "Bivariate flood

frequency analysis using the copula method." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 11, No. 2, pp. 150-164.

paper number : 14-028

Received : 17 March 2014

Revised : 29 September 2014 / 16 October 2014  
14 November 2014

Accepted : 14 November 2014