

용수부족지표를 이용한 다목적댐의 비상용수 공급 효과 분석

Analysis of Emergency Water Supply Effects of Multipurpose Dams Using Water Shortage Index

이 광 만* / 이 재 응**

Lee, Gwang-Man / Yi, Jaeeung

Abstract

One of the important purposes of most water resources systems is to prevent from drought damages. However, there are uncertainties in water supply plans from a reservoir due to factors such as limitation of available data, inaccuracy of surveyed data, unsuitability of analysis method, and climate change. In actual operating process, severe drought exceeding the water supply capability makes the normal water usage difficult. In Korea, however, alternative water source such as a development of new water project is very limited in case of water shortages due to drought. Especially, since there is no standard to evaluate the water supply effect considering severe drought damages, it is difficult to prepare the practical measures. In this study, water shortage events of existing multipurpose reservoirs are analyzed and the method of using low-storage emergency water supply is studied by using Water Shortage Index (WSI). The water shortage events are analyzed and the effect of water shortage decrease is evaluated using the existing inflow data of multi-purpose reservoirs. The results show that Imha, Daechung, Hapchon and Namkang reservoirs are highly vulnerable to the severe drought and required to develop additional emergency water source.

Keywords : water supply plan, severe drought, emergency water source, water shortage index

요 지

수자원 시스템의 중요한 기능 중 하나는 갈수 피해를 방지하는 것이다. 그러나 댐에 의한 용수공급계획은 이용 가능한 자료의 한계, 조사 자료의 부정확, 해석 방법의 부적합 그리고 기후변화 등의 요인에 의해 불확실성이 존재한다. 실제 운영과정에서는 이수안전도를 초과하는 이상가뭄 발생 시 용수부족이 발생하여 제한급수 등 정상적인 물이용이 불가능해진다. 그러나 우리나라는 가뭄에 의해 물 부족이 발생할 경우 대체수원개발 등 딱히 마땅한 대처수단이 없으며, 갈수대책을 위한 수원확보도 미미한 실정이다. 특히 이상가뭄에 의한 피해정도를 고려하여 용수공급효과를 평가할 수 있는 기준이 마련되어 있지 못해 현실적인 대책을 마련하기 어려운 실정이다. 본 연구는 기 제시되어 있는 용수부족지표를 이용하여 기존 다목적댐의 저수(低水)용량을 비상용수 공급원으로 활용하는 방안에 대하여 검토하였다. 기존 다목적댐의 유량자료를 이용하여 용수부족사상을 분석하고 용수부족 감소 효과를 평가하였다. 적용 결과 임하, 대청, 합천 및 남강댐의 경우 이상가뭄에 매우 취약한 것으로 나타났으며 가뭄대비용 비상용수의 추가 확보가 필요한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 용수공급계획, 이상가뭄, 비상용수, 용수부족지표

* 교신저자, Kwater, Kwater 연구원 수석연구원 (e-mail: lkm@kwater.or.kr, Tel: 042-870-7420)

Corresponding Author, Korea Institute of Water & Environment, Kwater, Jonmindong, Yongsong, Daejeon 305-730, Korea

** 아주대학교 건설시스템공학과 교수(e-mail: jeyi@ajou.ac.kr)

Professor, Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon 443-749, Korea

1. 서론

현대사회에서 용수공급은 시간적·공간적으로 변동성에 노출되어 있다. 용수공급 계획은 이와 같은 변동을 줄이고 계획량을 안정적으로 공급할 수 있는 방안을 마련하는 것이다. 보장공급 혹은 높은 신뢰도 수준의 용수공급은 계획이나 설계 당시 적용한 수문자료의 불확실성, 조사자료의 부정확, 해석 방법의 부적합 및 기후변화의 영향 등 많은 요인에 의해 불확실성을 내포하고 있다. 이런 불확실성 요소들이 결합되어 더 큰 불확실성을 만드는 경우도 있다. 따라서 어떤 계획이든 필요로 하는 용수요를 항상 만족시킬 수는 없으며 용수부족으로 인한 영향을 최소화하는 전략이 필요하다(Duckstein and Plate, 1987). 특히 이상가뭄 발생 시 갈수대책수원이 없을 경우 가뭄의 강도와 지속기간에 따라 사회·경제적 피해가 발생할 수 있다.

USACE(미국병단)은 직접 관리하는 300여개 댐을 대상으로 1987~1989의 극한가뭄에 대비하여 보다 안정적인 생·공용수 공급전략을 취하고 있다(USACE, 1990). 주로 사용하지 않는 유효저수용량, 퇴사나 장래 용수공급을 위해 배분된 용량, 유효저수용량의 변경, 갈수기 홍수조절용량 이용, 홍수조절용량 재배분, 운영율의 변경 및 타 기관의 댐과 연계 등 기존 댐의 저수용량을 적극적으로 활용하고 있다(Chang and Kleopa, 1991). Kelly (1986) 등도 이상가뭄에 의한 긴박한 용수부족사태에 대처하기 위해 용수공급 용자제도, 저수용량의 통합, 최소 방류량 및 사업목적 변경 등 저수지 운영방법을 수정하는 대안을 검토한 바 있다.

최근 중국도 북경 등 반 건조지역에 위치하여 하천수량이 부족하고 가뭄에 취약한 황하북부지역에 대하여 남수북조(南水北調)사업을 포함하여 비상용수 공급사업을 추진하고 있다. 허베이(허북)성의 랑팡시(www.chinabidding.com.cn, 2012)는 2014년까지 35백만 m^3 의 비상용수공급을 위한 댐을 계획하고 있다. 북경시는 2010년 허베이성 광난황비장 및 왕쿠아이 저수지로부터 각각 1억 m^3 의 비상용수공급 방안을 수립하였다(www.21tradenet.com, 2010). 일본도 가뭄 시 피해가 현저한 지역을 중심으로 이수안전도 향상을 통하여 피해를 최소화하기 위해 갈수대책용량을 확보하고 있다. 이를 위해 기존댐 증고를 통해 상부에 용량을 추가 확보하거나 저수지를 준설하여 저수용량을 확대하는 등 댐 갈수대책용량을 확보하고 있으며, 신규댐을 개발하여 이상가뭄에 대비하고 있다(일본국토교통성, www.mlit.go.jp).

이와 같이 국외에서는 이상가뭄에 대한 우려와 용수공

급의 안전도를 높이기 위한 노력이 적극적으로 추진되고 있으나 우리나라는 지난 봄철가뭄에서 보았듯이 아직 특별한 대책이 시행되지 못하고 있다. 또한 이상가뭄에 대비한 갈수대책용량이나 비상용수원을 확보하고 이용하는 방법은 일반적인 수자원 계획과 구분하여 접근할 필요가 있다. 실제 비상용수원은 정상적 용수공급원이 아니므로 이상가뭄에 의한 물 부족피해여부를 판단하여 평가하는 것이 현실적이다. 그러나 이상가뭄에 대한 대규모 다목적댐의 저수용량을 비상용수로 활용하는 방안에 대한 연구는 소수에 불과하며(윤슬기 등, 2008; 문장원과 이동률, 2009), 평가지표 관련 연구는 이동률 등(2006)이 물공급능력지수(Water Supply Capacity Index, WSCI)를 적용한 사례 정도이다.

일반적으로 수자원 시스템의 이행도를 평가하는 지표로는 Hashimoto et al. (1982)이 제시한 신뢰도(reliability), 회복도(Resilience) 및 취약도(vulnerability) 등이 근간을 이루고 있다. 이 지표들은 일정 기간을 대상으로 용수공급의 부족 혹은 만족 여부를만을 발생확률로 평가하거나 시스템이 불만족 상태로 들어온 후 얼마나 빨리 만족 상태로 되돌아가는지 또는 실패사상의 용수부족 크기 정도를 평가하는데 이용된다. 즉, 용수부족사상에 대한 통계학적 분석에 근거하고 있어 이상가뭄과 같은 이수안전도를 초과하는 물 부족에 의한 피해규모 정도를 평가하는 데는 한계가 있다. Takeshi (1990)는 이수안전도 지표를 다섯 개의 그룹으로 구분하면서 신뢰도, 회복도 및 취약도 등과 같은 지표는 물 부족에 따른 피해발생 정도를 판단하기 어렵다고 하였다. 이를 보완할 수 있는 방법으로 USACE (1975)과 JWRDPC(일본수자원개발공단) (1977)이 개발한 용수부족지표(shortage index)는 용수부족 발생빈도, 지속기간과 부족량을 동시에 평가하면서 물 부족에 의한 피해자료가 있으면 피해규모를 추정할 수 있는(USACE, 1975; Hsu, 1995) 경험적 지표이다.

결국 수자원 시스템을 대상으로 한 용수공급 계획은 제한된 수문정보를 이용하여 대안을 평가하기 때문에 운영과정에서 장래 이상가뭄 등 계획 당시에 고려하지 못했던 현상들을 직면할 수 있다. 또한 수자원 시설물은 용수공급의 안정성을 확보하기 위하여 무한정 크게 개발할 수 없고 경제성과 타당성 그리고 비용의 적정 배분과 사회적 공평성 등을 고려하게 된다. 이에 따라 이수안전도를 초과하는 이상가뭄에 의해 물 부족이 발생할 경우 마땅한 대처수단이 없어 비상용수의 확보가 중요한 과제이다. 또한 물 부족 발생에 따른 피해 정도를 기준으로 이상가뭄에 대한 평가방법이 마련되어 있지 못하다. 이에 대해 본 연

구는 이상가뭄과 같이 피해를 수반하는 물 부족문제에 대한 대안으로 기존 다목적댐의 저수(低水)용량을 비상용수원으로 활용하는 방법을 검토하였다. 비상용수 평가방법은 통계적 분석지표가 아닌 물 부족에 의한 피해발생의 정도를 경험적으로 평가하는 용수부족지표를 이용하였다. 적용결과 낙동강 유역의 임하, 합천 및 남강댐과 금강 유역의 대청댐 등은 이상가뭄에 취약하고, 이에 대비하여 추가적인 비상용량의 확보가 필요한 것으로 나타났다.

2. 용수부족지표

하천에 건설된 수자원 시스템을 이용한 용수공급의 경우 물 부족현상은 기상학적 가뭄이 수문학적 가뭄으로 이어져 하천유량이 작아지고 이에 따라 용수공급의 장애로 인해 사회·경제적 가뭄으로 발전한다. 어떤 특정 가뭄 사상에 대해 수자원 시스템을 이용한 용수공급에서 가뭄에 의한 취약성은 사회·경제뿐만 아니라 하천환경 및 생태계에도 큰 영향을 미치게 된다. 이때 용수공급 시스템은 용수부족을 피하기 위하여 최적의 운영방안을 도출하여 적용하나 가뭄이 길어질 경우 저수지의 물은 고갈되어 공급이 수요를 충족시키지 못해 용수부족이 발생하고 물 부족에 의한 피해가 발생한다.

우리나라에서 용수공급계획 수립시 이러한 이상가뭄에 의한 물 부족 피해정도를 고려하여 평가하기는 현실적으로 어려우며, 또한 물 부족에 의한 피해정도를 평가할 수 있는 방법이나 기준이 제시되어 있지 못하다. 일반적인 수자원시스템 계획에서 가장 많이 이용되고 있는 평가지표는 신뢰도, 회복도 및 취약도 등이다. 그러나 이러한 지표들은 수자원 개발 계획과정에서 설계공급량 혹은 공급가능량을 결정하는 기준으로 이용되나 물 부족의 발생정도를 통계적인 분석방법에 기초하고 있어 이상가뭄과 같은 물 부족에 의한 피해정도를 평가하기 어려운 점이 있다. 본 연구에서 다루는 물 부족에 의한 피해발생 여부는 사회·경제적으로 양적 혹은 질적인 장애가 구체적으로 발생하고 금전적 피해가 발생하는 상황에 대한 것이다. 따라서 이상가뭄과 같이 피해발생이 예상되는 경우 보다 실용적인 평가를 위해서는 피해사례를 기초로 한 경험적 용수부족지표를 이용하였다.

이와 같은 용수공급 부족지표는 USACE (1975)이 개발한 평균용수공급부족률(average water shortage rate)과 최대용수공급부족률(maximum water shortage rate)이 있다. 또한 JWRDPC (1977)은 부족량과 지속기간을 평가하기 위하여 일일용수공급부족지표(water deficit per day,

DPD)를 개발하여 적용해 오고 있다. Huang (1986)은 이들 단일지표를 보완한 복합용수공급부족 지표를 개발하여 대만의 저수지 운영 계획에 적용한바 있다. Hsu (1995)는 이들 지표를 종합한 용수공급부족지표(generalized shortage index, GSI)를 개발하여 제시하였다. 이들 지표의 특징은 용수부족 발생빈도보다 물 부족 상태를 지속기간과 부족량으로 나타낸 것으로 통계적 분석방법보다 공급부족에 따른 피해의 크기를 추정할 수 있는 경험적 자료에 기초하고 있다.

공급부족량 개념으로 나타낼 수 있는 특정기간의 용수공급부족률(deficit rate, DR)은 다음과 같다.

$$DR = \left(\frac{\text{Total Deficit}}{\text{Designed Water Supply}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

수자원개발을 목적으로 하는 저수지 시스템 계획에서는 전체기간에 대해 최대용수부족률(maximum deficit rate, MDR)과 평균부족률(average deficit rate, ADR)은 단순 부족률(DR)보다 중요한 의미를 갖는다. 이에 대해 부족량의 크기를 가중하여 평가하기 위해 USACE (1975)이 개발한 부족지표(shortage index, SI)는 다음과 같다.

$$SI = \frac{100}{N} \sum \left(\frac{\text{Annual Water Deficit}}{\text{Designed Annual Water Supply}} \right)^2 \quad (2)$$

여기서, N은 표본년의 수, \sum 는 모든 용수부족년에 대한 지표값의 합이다. 이 지표는 댐 건설과 연계하여 용수부족 추정치로 이용되며 용수부족의 사회·경제적 영향이 용수공급 부족률의 자승에 비례함을 의미한다. 따라서 연간 용수공급 부족률이 매년 2배가 되면 SI값은 4배가 된다. SI값이 1.0이라는 것은 매 10년마다 32%의 연간용수부족이 발생하고, SI값이 0.25라는 것은 매 10년마다 16%의 연간용수부족이 발생한다는 의미이다.

또한 용수부족의 발생빈도(frequency), 강도나 크기(intensity) 그리고 지속기간(duration) 역시 수자원 개발 계획에서 매우 중요한 평가대상 요소이다. 용수부족기간을 가뭄사상의 전체 시간이라고 하면 용수부족 강도는 이 가뭄사상의 평균부족량이다. JWRDPC은 용수공급부족과 지속기간을 포함하는 지표를 다음과 같이 제시하였다.

$$DPD = \sum \left[\begin{array}{l} \text{Daily Deficit Rate (\%)} \\ \times \text{Number of Days of Continuous Deficit} \end{array} \right] \quad (3)$$

여기서, \sum 는 검토하는 기간 동안에 모든 용수부족사상에 대한 지표값의 합이다. 일본수자원학회(JWRDPC, 1977)는 이 지표값에 대한 조사를 통해 임계 DPD (critical DPD)

를 공공용수에 대해서는 1,500%·day, 공업용수에 대해서는 2,500%·day로 제시하였다. 여기서 DPD의 임계치는 용수부족으로 인해 발생할 수 있는 영향을 감내할 수 있는 수준으로 그 이상 지속되는 경우 피해가 급속히 확대된다. 1,500%·day의 DPD 값은 30%의 용수공급부족률 상태가 50일 지속되는 경우와 50%의 용수부족사태가 30일 지속되는 것이다. Hsu (1995)는 대만의 경우 50%의 용수부족이 100일간 지속될 경우 사회는 패닉상태에 빠지므로 이런 비상상황에 의한 사회적 위기를 극복할 수 있는 비상대처계획이 필요하다고 강조하였다.

USACE이 제시한 SI는 연간용수부족량을 기준으로 평가하므로 적용하기에 유용한 측면이 있다. 그러나 용수부족 강도나 지속기간을 정의하기에는 매우 모호하다는 단점이 있다. 반면 JWRDPC의 DPD는 용수부족상태를 자세히 평가할 수 있다는 장점이 있다. Hsu (1995)는 SI와 DPD의 기본개념을 살리고 장점을 반영하여 GSI를 다음과 같이 개발하였다.

$$GSI = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{DPDa_i}{100 \times DY_i} \right)^k \quad (4)$$

여기서, N 은 적용기간의 년 수이며, k 는 상수로 보통 2를 적용한다. DY_i 는 i 번째 해의 날짜 수(365 혹은 366)이며, $DPDa_i$ 는 i 번째 년의 DPD 의 전체 합이다. 만약 용수부족이 두 해에 걸쳐있으면 용수부족이 큰 해에 포함되며, 그해의 날짜 수는 이에 따라 조정된다. 즉 26년간 기록 중에서 35%의 용수부족이 한 해에 두 번에 걸쳐 발생한 경

우, 처음 용수부족발생은 평균 45%의 용수부족률로 31일간, 두 번째는 용수부족은 평균 96%로 130일간 발생했다면 DPD는 각각 1,395 및 12,480%·day이다. 이들 값을 Eq. (4)에 대입하면 GSI는 0.56이 된다.

결국 본 논문에서 제시하고 있는 용수부족지표는 물 부족에 따른 피해유발기준과 물 부족사상의 핵심적인 요소인 지속기간과 크기의 상대적 비교가 가능하다는 특징을 보여주고 있다. USACE (1975)과 Hsu (1995)가 제시한 지표는 용수부족량의 크기에 따른 피해의 정도를 제공 혹은 지수값을 미지상수(k)로 표시한 것으로 물 부족에 따른 사회·경제적 피해에 대해 가중치 평가 개념을 고려하였다고 할 수 있다. 또한 JWRDPC (1977)은 복합지표(multiple estimator)를 활용할 경우 물 부족사상별 상대적 비교평가가 용이하다는 장점이 있다고 제시하였다.

3. 비상용수 공급 가능량 및 평가 모형

3.1 비상용수 공급 가능량 및 적용 조건

주요 다목적댐의 경우 설계당시 Fig. 1과 같이 수력발전편익을 위한 유효수두의 증대, 발전방류구의 위치에 따른 공기흡입 방지, 저수지내 어족과 야생동물의 생존보존 및 댐 건설과 관련 구축을 받는 상·하류 수리구조물의 기능유지 등을 위해 저수용량을 할당하였다. 이들 저수용량은 정상적인 용수공급계획에는 포함되지 않고 이상가뭄시 용수공급에 기여할 수 있는 비상용수로 활용할 수 있다. 이들 저수용량은 방류시설의 유무 혹은 방류시설의

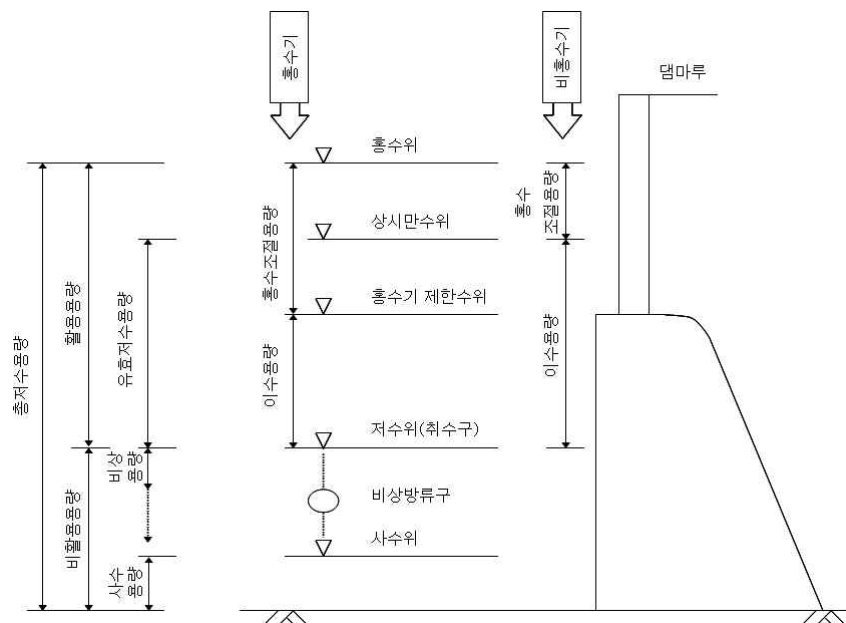


Fig. 1. Description of Water Level and Storage Distribution in Dam (MOCT, 2005)

추가 설치를 통해 이용이 가능하다.

우리나라 주요 댐의 비상용수 활용 가능량은 Table 1과 같다. 규모별로는 충주댐이 500백만 m^3 에 이르며, 소양강댐이 370백만 m^3 정도이다. 다음은 대청댐이 270백만 m^3 을 확보하고 있으며, 안동, 합천, 임하 및 섬진강댐 순이다. 반면, 남강댐은 유역면적이나 유입량 규모에서 소양강댐보다 크나 비상용량을 갖고 있지 않다.

용수공급 부족사상을 평가하기 위한 용수수요 조건은 Table 2와 같이 각 댐의 월별 계획공급량을 일별로 배분하였다. 유량자료는 Table 3과 같이 댐 건설 이후부터 2009년까지의 일 유입량 자료를 적용하였다.

3.2 저수지 모의 모형

본 연구에서는 각 댐을 단일운영조건으로 계획공급량의 충족여부를 판단하기 위해 모의모형을 개발하여 적용하였다. 저수지 모의 운영을 위해서는 상태변수의 변화를 시간에 따라 추적하기 위한 상태방정식을 수립하여야 한다. 이는 전 단계의 운영 결과를 바탕으로 현 단계에서 변

화하는 시스템의 상태를 파악해야 다음 단계의 운영조건을 구성할 수 있다. 본 연구에서 적용한 상태방정식은 저류량을 상태변수로 하여 Eq. (5)와 같이 정의하였다.

$$X_{t+1} = X_t + I_t - D_t - E_t(X_t, X_{t+1}) - R_t \text{ for } t = 1, \dots, T \quad (5)$$

여기서, X_t 는 저류량, I_t 는 유입량, D_t 는 댐에서의 직접 취수량, E_t 는 증발손실량, R_t 는 방류량을 나타낸다. t 와 $t+1$ 은 운영단계 t 의 시작과 끝을 나타낸다. 댐의 손실량은 수면증발량이나 댐 체의 누수량 등이 있으나 댐에서 관측한 저수지 유입량 자료를 이용하고 누수량은 극히 미미하다고 판단하여 고려하지 않았다.

이수목적의 저수지 평가 모의 모형에서 적용하는 제약 조건은 유효저수용량의 적용범위와 방류량의 범위이며 다음과 같다.

$$X_t^{\min} \leq X_t \leq X_t^{\max} \quad (6)$$

$$R_t^{\min} \leq R_t \leq R_t^{\max} \quad (7)$$

Table 1. Emergency Water Supply Capability Using Low Water Storage of Multipurpose Dams

댐 명	비상용수 공급설비	비상용수 공급 가능량(백만 m^3)
소양강댐	취수탑에서 취수, 분기하여 방류토록설치	370.0
충주댐	댐체 여수로내에 방류관 설치	496.0
안동댐	취수탑에서 취수, 분기하여 방류토록 설치	130.0
임하댐	취수탑에서 취수, 분기하여 방류토록 설치	84.0
합천댐	댐체 여수로내에 방류관 설치	130.0
대청댐	댐체 여수로내에 방류관 설치	270.0
섬진강댐	댐체 여수로내에 방류관 설치	78.0
주암댐	가배수로 터널에 방류관을 설치	15.0
남강댐	일류문 월류부	

Table 2. Planned Daily Water Supply Amount of Multipurpose Dams

댐 명	월별 1일 계획 공급량(백만 m^3 /일)											
	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
소양강댐	4.0	4.0	4.0	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.0	4.0	4.0
충주댐	8.4	8.4	8.4	9.2	10.3	10.8	10.0	10.4	9.3	9.1	8.4	8.4
안동댐	1.7	1.7	1.7	1.8	2.9	4.3	3.5	4.3	3.1	1.9	1.7	1.7
임하댐	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6
합천댐	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.8	1.8	1.8	1.7	1.6	1.6	1.6
대청댐	3.6	3.6	3.6	3.7	4.0	7.7	6.2	5.8	5.5	3.6	3.6	3.6
섬진강댐	0.2	0.2	0.2	0.4	0.7	3.7	2.9	3.4	1.5	0.2	0.2	0.2
주암댐	0.9	0.9	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8
남강댐	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1	2.5	2.7	2.9	1.8	1.2	1.2	1.1

$$X_t \geq 0, R_t \geq 0 \quad (8)$$

여기서, X_t^{\min} 과 X_t^{\max} 는 운영단계 t 에서 저류량의 하한값과 상한값을 나타내며, R_t^{\min} 과 R_t^{\max} 는 운영단계 t 에서 방류량의 하한값과 상한값을 나타낸다. Eq. (8)은 저류량과 방류량의 비음 조건(non-zero)을 나타낸다.

4. 용수부족 사상 및 비상용수 효과 분석

4.1 용수부족 사상 및 부족지표

앞장에서 제시된 주요 용수공급 부족지표를 이용하여 8개의 다목적댐에 대하여 분석하였다. 분석 대상 댐은 Table 1과 같이 비교적 비상용수 공급 가능량이 큰 댐으로 정하였다. 이들 댐들은 수력발전 편익증대를 위해 유효수두를 높이고 퇴사량 등 저수지의 경제수명을 고려하여 설계된 댐들로 비교적 저수용량을 많이 확보하고 있다. 이때 적용기간은 각 댐별로 준공시기가 달라 정상운영 시작 이후의 댐 유입량을 이용하여 Table 3과 같이 적용하였다.

적용 결과, 계획공급량에 대한 용수부족 현황은 각 댐별로 Figs. 2~8과 같다. 이들 그림에 나타난 물 부족 현상을 물 부족 사상 수, 발생시기, 발생기간, 공급부족량, 공급부족률 그리고 용수공급부족지표를 정리하여 분석에 활용하였다. 모의대상 댐 중 소양강과 주암댐은 용수부족이 발생하지 않아 분석에서 제외하였다. 소양강댐은 유효

저수용량이 비교적 크고 조절방류기능이 우수하며, 주암댐의 경우 하천유지 및 댐에서 직접 취수하는 양을 제외한 대부분을 조절지 댐으로 도수하고 있어 용수부족이 발생하지 않은 것으로 판단된다.

Figs. 2~8을 댐별로 상세히 분석하면, 우선 대청댐의 경우 Fig. 2에서와 같이 용수부족 사상이 9회 발생하였으며, 평균 용수공급 부족률은 60%를 상회하였다. 섬진강댐의 경우 Fig. 3과 같이 용수부족현상이 75년 및 95년에 걸쳐 4회에 발생하였으며, 부족률은 70% 이상이였다. 안동댐의 경우 Fig. 4와 같이 비교적 적은 수의 용수 부족 사상이 나타났으나 용수공급 부족률은 60% 이상이였다. 임하댐의 경우(Fig. 5) 전체 19회의 용수 부족사상이 나타났으며, 부족률은 18.8~93.8%에 걸쳐 분포되었고, 평균 부족률은 74% 수준으로 매우 높았다. 총 부족일수는 949일이였다. 충주댐은 Fig. 6과 같이 총 6회의 용수 부족 사상이 있었으며 평균 부족률은 63% 수준이였다. 합천댐은 전체 19회의 물 부족사상이 있었으며, 평균 부족률은 72.5%, 전체 물 부족 기간은 823일이였다(Fig. 7). 마지막으로 남강댐은 30회의 용수 부족 사상이 발생하였고, 부족률은 55.1%였다. 전체 부족일수는 574일이였다(Fig. 8).

이상의 결과를 종합해 볼 때 대청, 임하, 합천 및 남강댐은 용수부족지표의 모든 부분에서 이상가물에 매우 취약한 결과를 보여주었다. 이들 댐들은 용수공급 부족일수도 길었으며 용수공급 부족률 역시 높은 값을 보여주었다. 특히 남강댐의 경우 저수용량이 유역면적에 비해 작

Table 3. Inflow Data Periods for Reservoir Simulation of Multipurpose Dams

댐 명	분석 기간(년도)																																							
	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09				
소양강댐																																								
충주댐																																								
안동댐																																								
임하댐																																								
합천댐																																								
대청댐																																								
섬진강댐																																								
주암댐																																								
남강댐																																								

고 용수 공급량은 크게 할당되어 다수의 용수부족 사상이 나타났으나 발생기간 및 부족률은 상대적으로 낮게 나타났다. 또한 이상의 분석결과를 통해 알 수 있듯이 물 부족량이 크고 물 부족 지속기간이 길어 실질적 피해가 발생할 수 있는 가뭄은 '94~'96과 '08~'09년에 집중적으로 나타나고 있어 이들 기간을 이상가뭄 기간으로 볼 수 있다.

앞의 그림과 같이 모의된 결과를 바탕으로 용수공급 부족지표를 계산하였다. Fig. 9는 각 댐의 용수공급 부족사상의 DPD 값을 도시한 것이다. 일본의 수자원개발공단이 제시하고 있는 용수 수요 분야별 DPD 지표를 적용하여 각 댐의 이상 가뭄 취약성을 평가하였다. 일본수자원개발공단(1977)은 생활용수 공급부족이 발생할 경우 1,500%

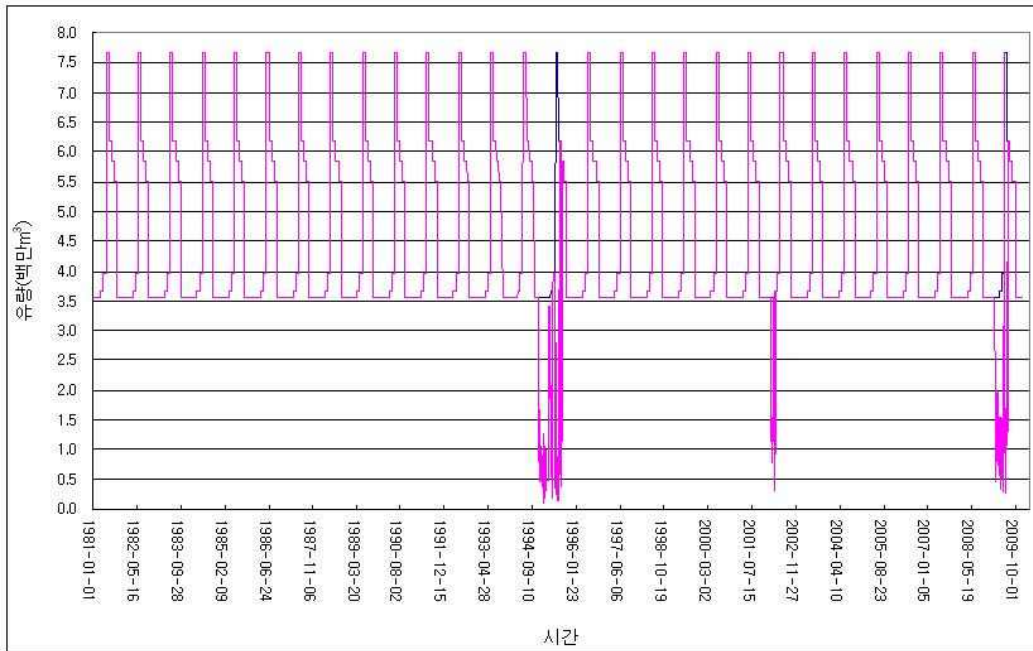


Fig. 2. Simulated Water Deficit Events in Daechung Dam

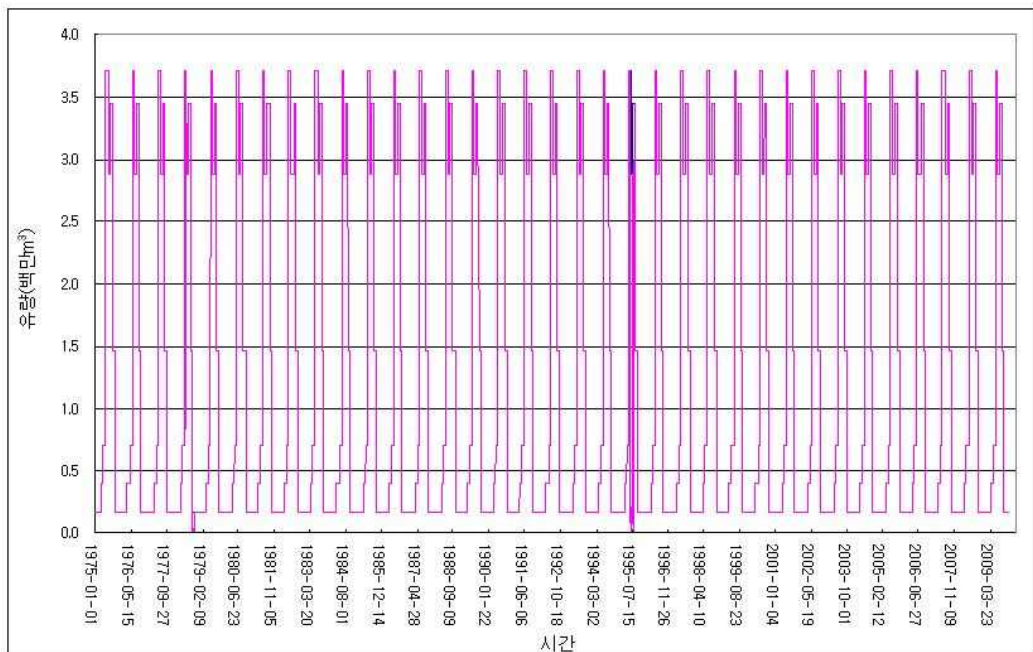


Fig. 3. Simulated Water Deficit Events in Sumjingang Dam

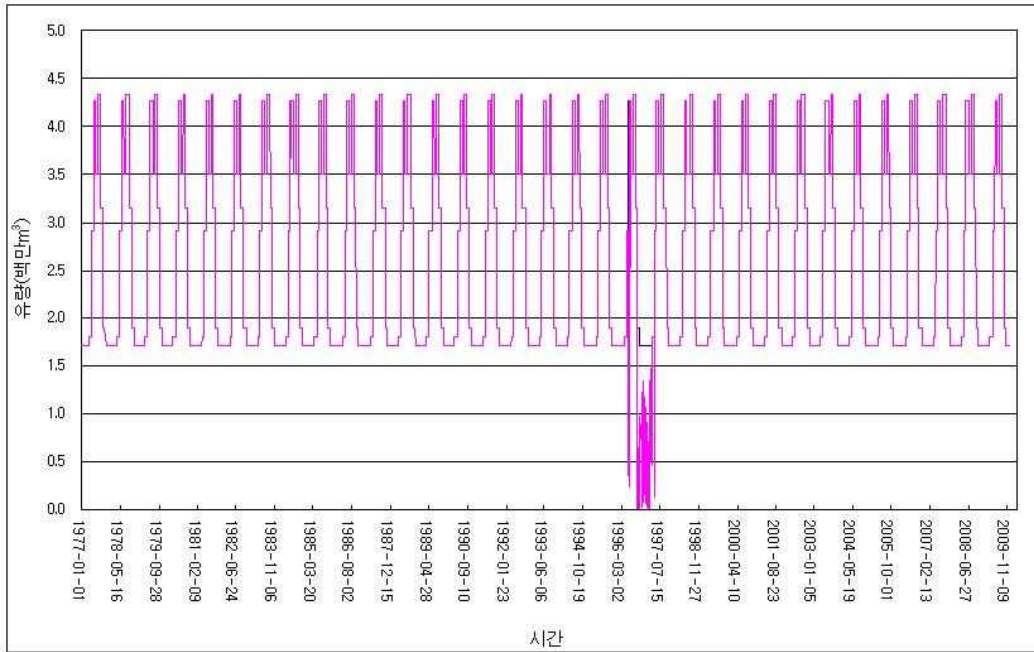


Fig. 4. Simulated Water Deficit Events in Andong Dam

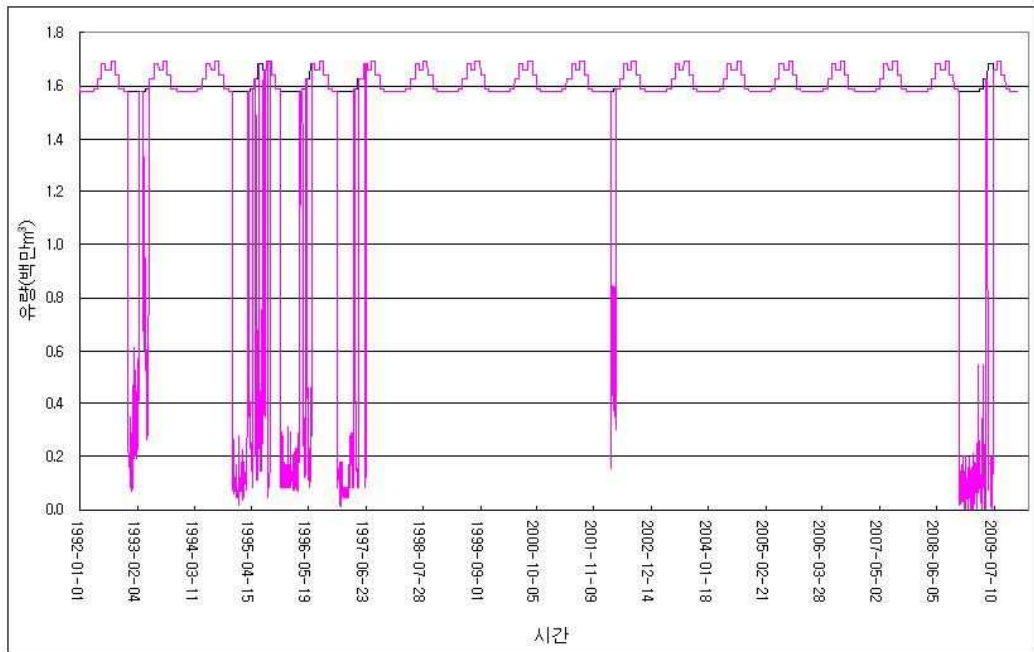


Fig. 5. Simulated Water Deficit Events in Imha Dam

day까지는 피해가 제한적이거나 그 이상의 경우 사회적 불안 및 주민 생활의 불편 그리고 피해가 급속히 증가하는 것으로 평가하였고, 농업용수의 경우는 2,500%·day를 가림에 적응할 수 있는 임계치로 보았다. 2,000%·day는 생활용수와 농업용수의 평균치이며, 우리나라 대부분의 다목적댐의 경우 생활용수와 농업용수를 같이 공급하고 있

어 제시된 값이다.

2,000%·day를 기준으로 Fig. 9의 결과를 분석해 보면 임계치를 초과하는 댐은 대청, 임하, 안동 및 남강댐 등이다. 이들 댐 중 임하, 합천 댐 대청댐은 비교적 큰 수치를 보여주고 있다. 용수공급 부족률도 50% 이상이며, 부족기간은 40~200일에 걸쳐 분포하고 있다. 나머지 댐들은 비

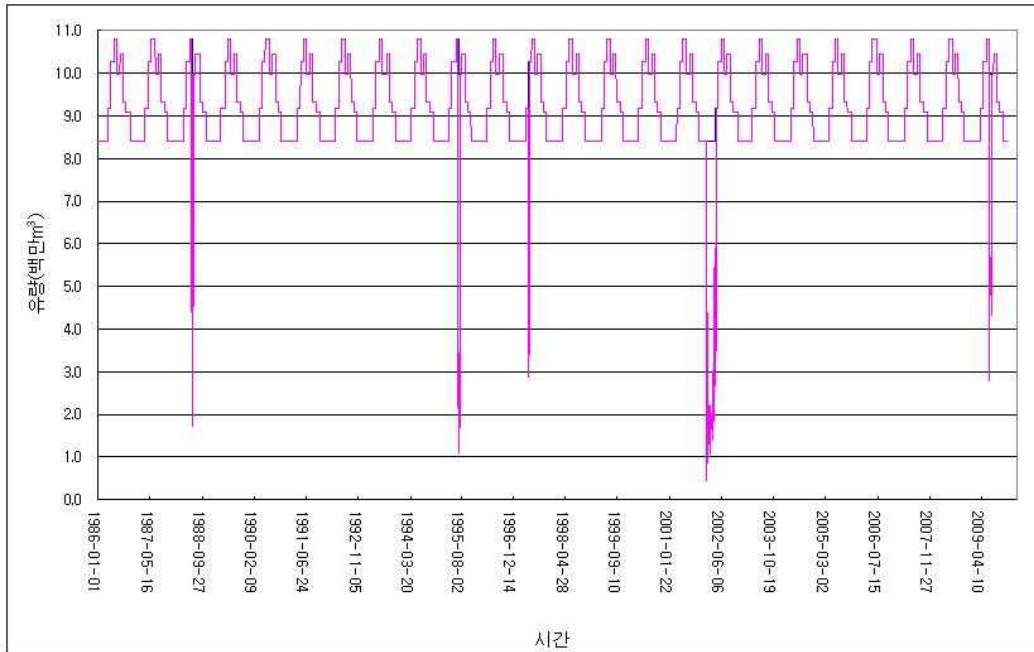


Fig. 6. Simulated Water Deficit Events in Chungju Dam

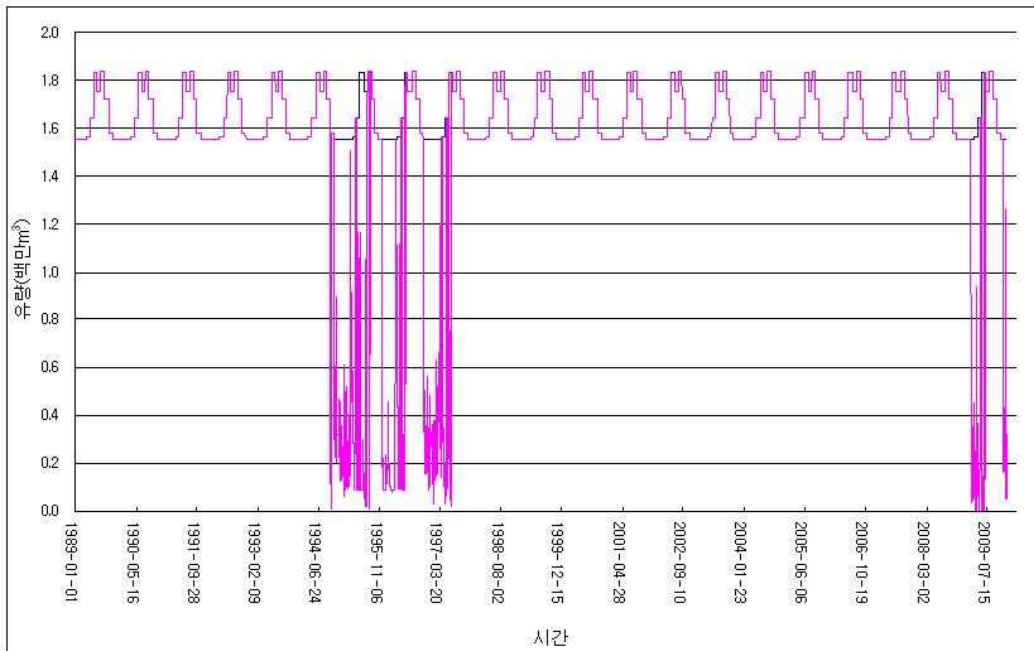


Fig. 7. Simulated Water Deficit Events in Hapchon Dam

교적 생활용수 임계기준치 이내에 분포하고 있어 이상가
 물에 의한 영향이 작을 것으로 나타나 갈수조정을 통해
 공급량을 조절할 경우 상대적으로 용수부족 취약성을 개
 선시킬 수 있을 것으로 평가되었다. 충주댐과 섬진강댐은
 농업용수 임계치를 초과하고 있으나 그 정도가 낮게 분포
 하고 있어 이들 댐 역시 가뭄발생시 갈수조정을 통해 가

물을 극복할 수 있을 것으로 판단되었다.

4.2 비상용수 공급 효과

비교적 용수공급 부족사상과 부족량이 크게 나타나고
 있는 댐을 대상으로 비상용수 공급 가능량을 활용하는 경
 우에 대하여 분석하였다. 적용방법은 Table 1에서 제시되

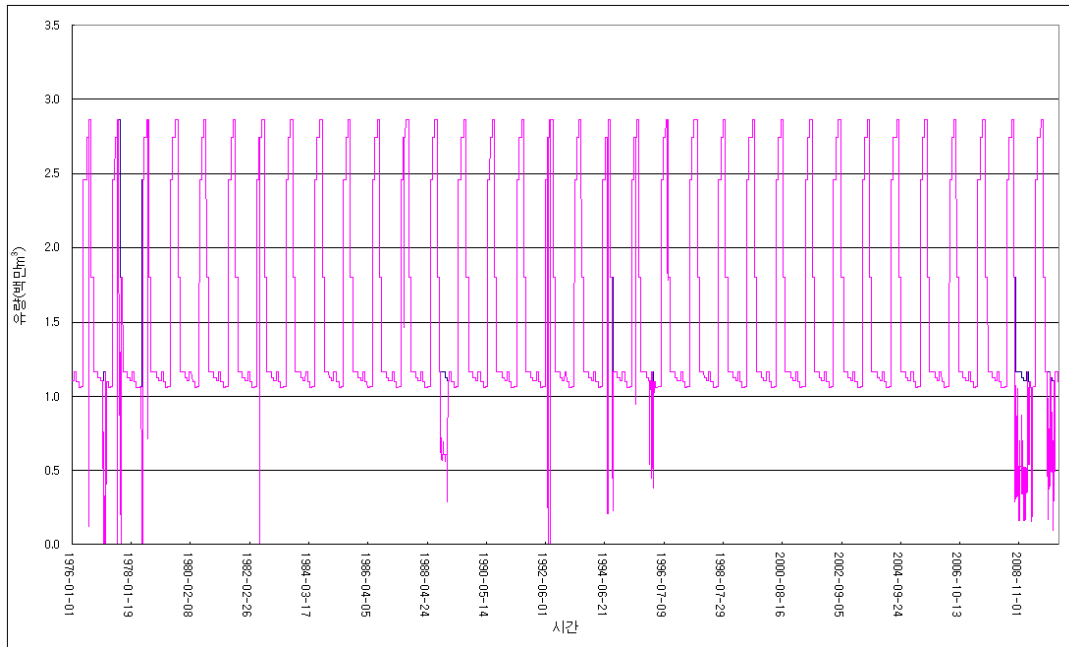


Fig. 8. Simulated Water Deficit Events in Namgang Dam

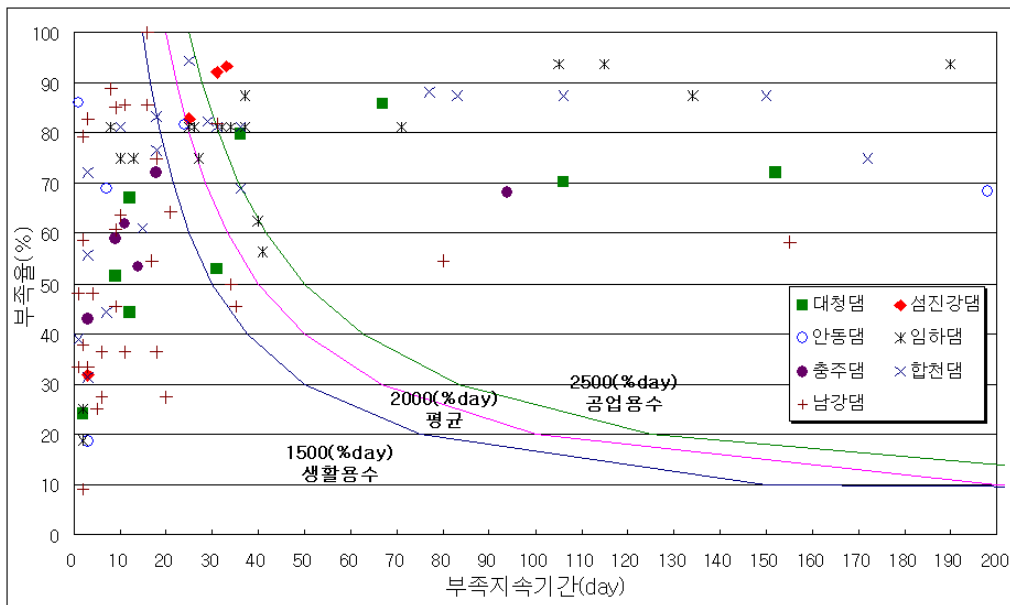


Fig. 9. Distribution of Estimated DPD in Multipurpose Dams

어 있는 비상용수 공급 가능량을 저수지 용수공급 조건에 포함하고 계획공급량을 기준으로 모의하였으며, 결과는 다음과 같다.

Fig. 10은 부족량의 비를 나타내는 SI 값을 보여주고 있다. 임하, 합천 및 대청댐의 경우 용수부족량이 크게 발생함을 알 수 있다. 비상용수 공급시 합천댐과 섬진강댐의 개선효과가 크게 나타났다. Fig. 11은 DPD의 결과를

보여주는데 임하, 합천, 대청 및 남강댐이 높은 수치를 보였다. 이들 값을 날짜로 환산하면 각각 810, 656, 302 및 306일의 용수공급 부족현상을 나타내었다. 특히 임하댐과 합천댐은 다년에 걸쳐 용수부족이 발생하고 있다. 비상용수 공급 시 개선효과는 충주, 임하, 합천 및 대청댐이 비교적 고른 효과를 보여주었다. GSI도 같은 추세를 보여주고 있는데 개선효과는 Fig. 12에서와 같이 임하와 합천댐이

크게 나타났으며, 충주, 대청 및 안동댐은 낮은 수준이었다. MDR의 경우 Fig. 13과 같이 충주댐을 제외하면 85% 이상의 높은 값을 보였는데 어느 특정 이상의 가뭄이 발생할 경우 용수공급이 불가능함을 알 수 있다. 비상용수에 의한 개선효과는 충주 및 안동이 높게 나타났으며 나머지 댐들은 미미하였다. 특히 임하, 합천 및 남강댐의 경우 극한가뭄에 취약한 것으로 나타났다.

비상용수공급을 통한 개선효과를 DPD 기준의 용수부족일수로 나타내면 Table 4와 같이 충주 87일, 안동 45일, 임하 77일, 합천 82일, 대청 77일, 섬진강 54일이었다. 전체적으로는 평균 71일의 용수부족일 감소 효과를 나타내

었다. 그러나 이 댐들은 현재 이용 가능한 비상용수를 활용하더라도 이상가뭄발생시 용수공급의 불확실성이 상당한 수준으로 존재함을 알 수 있다.

Table 4의 최대 DPD값을 기준으로 물 부족 피해 발생 기준치인 2,000%·day를 감한((정상)-(비상용수)DPD-2,000%·day)를 적용할 경우 추가 비상용수 필요량은 안동 227.5, 임하 219.2, 합천 158.2 및 대청댐 288.0백만 m^3 로 추정되었다. 충주댐의 경우 계획공급량에 비하여 부족량의 비가 적어 추가 비상용수 확보없이 갈수조정을 통한 용수공급을 시행할 경우 이상가뭄에 대응할 수 있는 여건이 가능한 것으로 나타났다. 남강댐의 경우 과거 운영기간 중

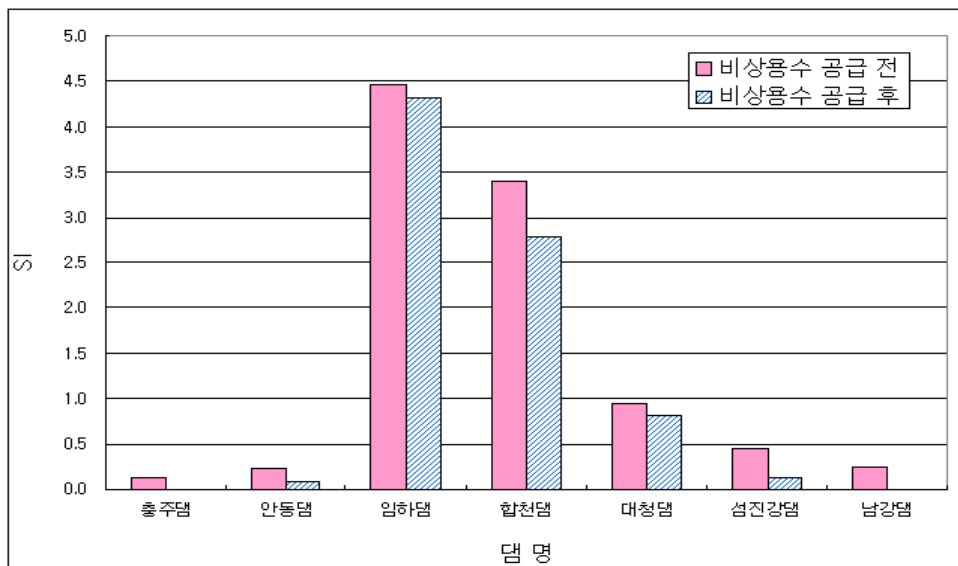


Fig. 10. Estimated Difference of SI Index between Normal and Emergency Operation

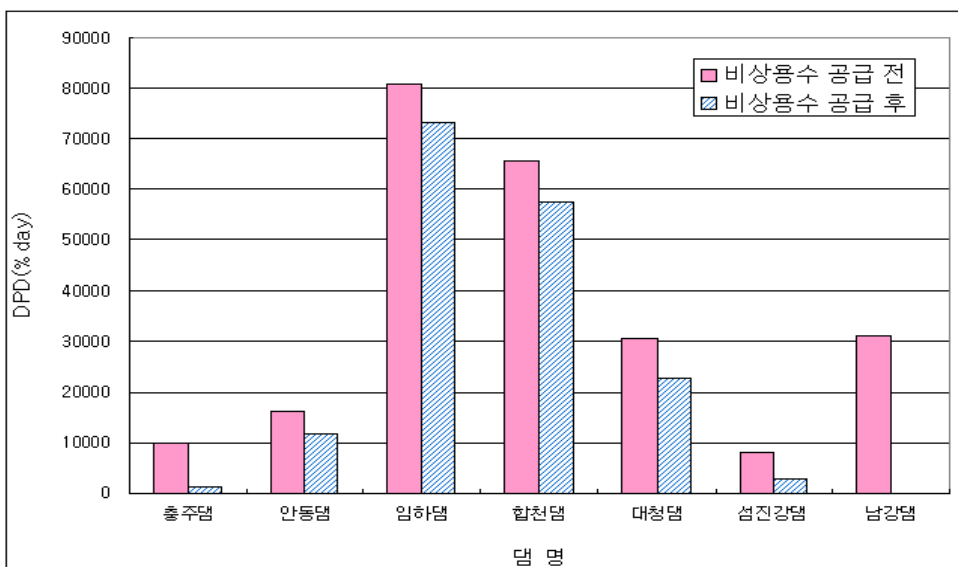


Fig. 11. Estimated Difference of DPD Index between Normal and Emergency Operation

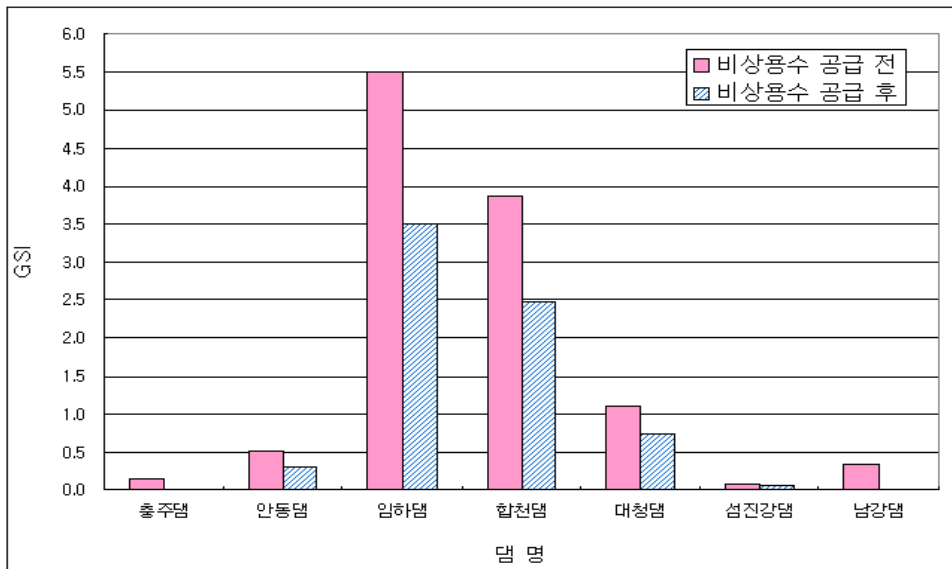


Fig. 12. Estimated Difference of GSI Index between Normal and Emergency Operation

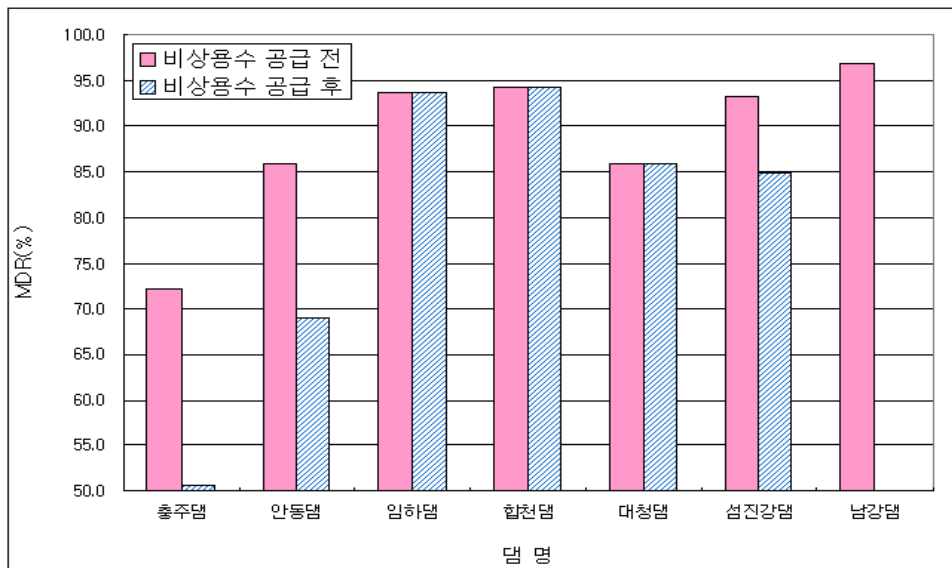


Fig. 13. Estimated Difference of MDR Index between Normal and Emergency Operation

Table 4. Decreasing of Water Shortage Day by Utilization of Low Water Storage

댐	정상운영 DPD (%day)	비상용수활용 DPD (%day)	(정상)-(비상용수) DPD (%day)	용수부족 해소 일수(일)
충주댐	9,832.2	1,112.4	8,719.8	87
안동댐	16,129.9	11,535.4	4,594.5	45
임하댐	80,975.3	73,287.6	7,687.7	77
합천댐	65,582.6	57,462.9	8,119.7	82
대청댐	30,562.0	22,814.2	7,747.8	77
섬진강댐	8,099.2	2,636.6	5,462.6	54
평균	35,196.8	28,141.5	7,055.3	71

수문기록에 의한 평가에서 DPD의 값이 33,379%·day로 추정되었고 최대 DPD가 9,041.7%·day로 나타나 113.6백만 m³의 비상용수 확보가 필요한 것으로 추정되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 경험적 용수공급 부족지표를 적용하여 주요 다목적댐의 비상용량을 활용하는 경우 이상가뭄에 대한 용수공급능력을 평가하였다. 개발된 저수지 모의 모형을 이용하여 1일 단위 운영 결과, 임하, 대청, 합천 및 남강댐의 경우 극한가뭄에 매우 취약한 것으로 나타났다. 이 댐들은 본 연구에서 적용한 SI, DPD, GSI 및 MDR 지표 모두에서 취약한 값을 보였으며, 정상적인 용수공급조건에서는 용수공급 부족률이 크고 공급부족 발생기간도 장기간에 걸쳐 발생함을 알 수 있다. 각 댐의 저수용량을 비상용수로 활용할 경우 DPD 기준으로 7,100% day의 개선효과가 나타나 71일에 해당하는 용수부족을 해소할 수 있는 수준으로 평가되었다. 용수부족사상 중 최대 DPD값을 기준으로 추가 비상용수 필요량은 안동 227.5, 임하 219.2, 합천 158.2, 남강 113.6 및 대청댐 288.0백만m³로 추정되었다. 댐 운영이후 우리나라 이상가뭄년은 '94~'95 그리고 '08~'09로 나타났으며 이들 가뭄년에 대한 갈수빈도를 정의하여 향후 수자원 계획의 지표로 활용할 필요가 있다. 가뭄에 의한 사회·경제적 피해를 최소화 할 수 있는 비상용수 확보 방안에 대한 적극적인 노력과 수자원 개발 및 관리 정책에 비상용수 개념의 도입이 요구된다.

참고문헌

건설교통부 (2005). 댐설계기준.
문장원, 이동률 (2009). “다목적댐 비상용수공급량 활용으로 인한 물 공급 능력제고 효과 분석.” **2009 대한토목학회 정기학술대회논문집**, 대한토목학회, pp. 3378-3381.
윤슬기, 김길호, 여규동, 심명필 (2008). “댐에 의한 비상용수 공급편익 산정 방안 연구.” **2008 한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 1540-1544.
이동률, 문장원, 이대희, 안재현 (2006). “저수지 가뭄감시를 위한 물공급능력지수의 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제3호, pp. 199-214.
Chang, T.J., and Kleopa, X. (1991). “A proposed method for drought monitoring.” *Water Resources Bulletin*, Vol. 27, No. 2, pp. 275 - 281.

Duckstein, L., and Plate, E.J. (1987). *Engineering Reliability and Risk in Water Resources*. NATO ASI Series, Series E: Applied Sciences, No. 124, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht.
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.
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.
Huang, J.S. (1986). “An appraisal of reservoir planning and shortage tolerances in Taiwan.” *Proceedings of 3rd Hydrology. Engineering Conference*, Tam-Kang University, Taipei, Taiwan, R.O.C., pp. 51-64 (in Chinese).
JWRDPC (Japan Water Resources Development Public Corporation). (1977). “Drought Assessment.” *Mizu To Tomoni*, No. 159, Tokyo, Japan.
Kelly, V. (1986). “Reservoir Operation During Drought: Case Studies.” *Research Document 25*, Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers.
Takeshi, Yamauchi (山内 虎) (1990). “利水安全度指標について.” *日本水文・水資源學會誌*, 日本水文・水資源學會, 第3卷, 第2號, pp. 3-8.
USACE (Hydrologic Engineering Center) (1975). “Hydrologic engineering methods for water resources development: Vol. 8, Reservoir Yield.” US Army Corps of Engineers, Davis, California.
USACE (US Army Corps of Engineers) (1990). Modifying Reservoir Operations To Improve Capabilities for Meeting Water Supply Needs During Drought, *Research Document*, No. 31.
www.21tradenet.com (2010). Emergency water diversion to Beijing, Hebei.
www.chinabidding.com.cn (2012). Hebei Langfang City, Guang Yang emergency water supply reservoir project.
www.mlit.go.jp (일본국토교통성 홈페이지).

논문번호: 12-041	접수: 2012.04.30
수정일자: 2012.06.20/07.19 2012.08.01/08.07	심사완료: 2012.08.07

