

자유경쟁 시장 내에서 용담다목적댐 발전소의 최적 계약가능 공급량 평가

Estimation of Optimal Hydro-Power Supply Amount of Yongdam Multipurpose Dam for the Contract on the Free-Competition Market

유 주 환*

Yoo, Ju Hwan

Abstract

Nowaday the amount of water resource to generate the hydro-power energy has decreased as that of the water supply has increased. In case that the national market of the energy will be in free competition, the energy producer need to suggest the amount of the optimal supply with the hydrological reliability for a deal. In this study the optimal reservoir operation was performed by the linear programming and the optimal reliabilities of inflows and the power supply were obtained by the one dimensional search technique to estimate the energy with the optimal inflow reliability which the power system of the Yongdam multipurpose dam in Geum river can produce. And the main results were presented.

Keywords : Yongdam multipurpose dam, hydro-power, hydro-energy supply contract, linear programming, inflow reliability

요 지

요즘 다목적댐의 수력발전을 일으킬 수 있는 수자원은 용수공급이 증가함에 따라서 점점 감소하고 있는 형편이다. 한편 국내 수력 발전량의 거래가 다자간의 시장경제 체제로 형성될 경우, 수력에너지 생산자는 최적 공급량과 공급의 수문학적 신뢰도 수준을 제시해야 한다. 이에 본 연구에서는 금강 수계 내 위치한 용담다목적댐의 수력 발전소에서 공급가능한 발전량과 공급 신뢰도를 평가하기 위하여 저수지 조작 기법으로 선형계획법을 적용하였고 1차원 조사항을 이용하여 유입량의 신뢰도와 수력 발전 공급량의 최적치를 결정하였고 그 주요 결과를 제시하였다.

핵심용어 : 용담다목적댐, 수력발전, 수력발전 공급계약, 선형계획, 유입량 신뢰도

1. 서 론

1.1 연구 목적 및 배경

한정된 수자원의 이용을 극대화하는 노력은 물 부족 국가(UN발표)로 분류되고 물 수요가 점점하고 있는 우리나라로서 매우 중요한 국가적인 이슈가 되고

있다. 한편 수자원의 계절적인 편차를 극복하기 위해서 건설된 다목적댐은 유입 수자원을 저류하거나 홍수를 조절함으로써 이수와 치수기능을 담당하고 있다. 본 연구에서는 국민 생활의 안전성을 고려하기 위하여 설계된 댐의 홍수조절 기능을 기본적으로 유지하도록 하고 이수적으로 댐 저류 수자원의 이용을 극대화한다. 이수적 측면에서 댐은 각종 용수공급, 수력발전,

* 영동대학교 건설계열 토목환경공학과 조교수

Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yeungdong University, Yeongdong-Gun, Chungbuk, ROK
(e-mail: jhyoo@yeungdong.ac.kr)

수운, 휴양 등의 기능을 담당하고 있다. 여기서 국내 다목적댐의 경우 용수공급, 수력발전 기능이 주요 이수 목적이고 다른 것은 부대 기능으로 취급되어 왔다. 이와 같은 측면에서 댐의 최적운영은 추계학적으로 유입된 수자원에 대하여 광역상수도, 지방상수도 등 용수공급을 최우선으로 공급하고 부대기능은 제약조건으로 하여 수력발전량을 최대화함으로써 달성할 수 있다.

한편 현재까지 우리나라의 수력발전은 국영 기업체인 공사에 판매되고 있으며, 공사는 생산 실적에 따라 계약된 일정한 요금을 생산자에게 지불하고 있지만 이러한 과정에서 전력 생산에 포함된 유입량의 추계학적 특성이 고려되지 않고 있다. 따라서 전력 시장이 자유화되고 있는 상황에서 유입량의 확률적인 신뢰도를 바탕으로 하여 합리적인 전력 생산량의 평가가 필요하다. 즉 전력 시장이 다자간 수요와 공급체계가 되면 전력 에너지 가격은 전력 부하의 계절적 변동과 전력 특성에 따라 차등적으로 적용될 것이고, 한편으로 전력 생산자가 계약한 전력량을 공급하지 못하는 경우에는 적절한 벌칙금(penalty)이 부과되어야 하기 때문에 수력발전량의 평가와 더불어 유입량의 확률이 신뢰도로서 필히 제시되어야 한다. 국내에서 댐운영 또는 저수지 조작의 최적화에 관한 선행된 연구는 다양하게 연구되었으며 이 중 수력발전 생산량에 대하여 유입량 신뢰도를 함께 제시한 연구(권오현과 유주환, 1993)에서는 대칭다목적댐을 대상으로 동적계획기법에 의한 수력발전 최적 댐 운영 모형을 적용하여 접근 방법과 결과 중심으로 최적 신뢰도 및 발전량을 제시하였다.

최근에는 농업용수의 수력발전 포텐셜을 평가하기 위한 연구(안태진 등, 1998)로 소요 관계용수를 제약조건으로 수력발전을 최대화하는 비선형계획 모형과 저수지 발전모의 운영을 통하여 기존 농업용댐의 부존 발전량을 추정하는 절차를 제시하였다. 그리고 한강수계 다목적댐 및 발전댐의 수력발전 최대화 연구(유주환 등, 1999)가 있었고 발전을 주목적으로 건설된 화천댐과 상류에 건설된 평화의댐을 연계한 최적 수력발전 및 운영 방안(유주환 등, 2001)이 제시되었다.

본 연구는 용담다목적댐을 대상으로 전력 시장이 자유화되는 상황에서 제시할 수 있는 최적 유입량의 신뢰도와 전력 생산량을 평가하였다. 이때 용담다목적댐의 설계 목적을 고려하여 용수공급을 최대화하도록 하고 설정된 댐하류 방류량을 최우선 공급하도록 하는 설계 조건 등을 반영하였다. 접근 방법은 선형계획으로 댐운영 모형을 최적화함과 1차원 조사법을 통하여 최적 신뢰도 유입량을 결정하였다.

본 연구는 추계학적인 저수지 조작 모형으로 신뢰도

모형(reliability model)을 적용하였다. 이와 같은 추계학적 모형은 수문학적인 불확실성 속에서 시간적, 공간적 또는 시공간적으로 상관성을 갖는 유출량의 추계학적 성질을 수학적 모형에 결부시키는데 있고 위험도(risk) 또는 신뢰도(reliability)를 고려하지 않는 추계학적 저수지 조작 모형은 예측치 못할 높은 확률로 신뢰도를 벗어나 실패(failure)할 수 있다(Lee와 Brill, 1987). Askew (1974a, 1974b, 1975)는 저수지 조작에 위험도 및 신뢰도를 고려하기 위해서 페널티 함수 접근법을 제안했는데 이 때 페널티를 변화시키며 저수지 시스템이 실패하는 확률을 조사하였다. Revelle 등(1969)은 위험도를 포함하는 신뢰도 모형으로 선형 결정룰(linear decision rule)을 개발하여 저수지를 계획하는 방법을 제안하였다. Colomi와 Fronza(1976)는 용수공급 계약량을 공급하지 못하는 경우의 페널티를 순편익과 조합한 확률계약 모형을 제안했다. 그리고 Simonovic과 Marino(1980)은 홍수조절 및 용수공급 목적을 갖는 다목적 저수지에 대하여 2변수 신뢰도를 적용하는 신뢰도 모형을 정식화하고 해법을 제시하는 등 신뢰도와 저수지 운영에 관한 연구가 있었다.

본 연구에서는 홍수조절과 용수공급 및 수력발전을 목적으로 하는 용담다목적댐에서 설계된 홍수 조절용량을 제약조건으로 기본 전제하고 용수공급을 통하여 수력 발전하는 시스템적 특성을 반영하는 최적 댐운영 모형에 유입량의 확률을 반영하는 신뢰도 모형을 적용하여 최적 공급 발전량과 신뢰도를 구하였다. 이때 수력 에너지의 신뢰도는 유입량 이외에 저수지 상태 및 방류량, 또는 생산 전력량 자체의 확률 분석이 이루어질 수 있으나 인위성을 갖는 저수지 조작법의 지배를 받거나 추계학적인 특성이 상대적으로 작아서 본 연구에서는 유입량만을 확률변수로 보았다.

1.2 연구 개요

본 연구의 개괄적인 흐름도는 그림 1과 같다. 본 연구는 용담다목적댐의 수력 발전 판매를 위한 계약 신뢰도와 발전량을 결정하려는 연구목적으로 기획되었다. 댐운영 모형은 선형계획 모형으로 정형화하고 발전함수와 유입량의 페널티로 구성된 목적함수를 최대화하기 위해서 1차원으로 조사하여 최적 발전량과 함께 유입량 신뢰도를 결정하였다(권오현과 유주환, 1993).

2. 연구모형

본 연구의 대상이 되는 용담다목적댐에 대한 최적화 연구 모형은 다음과 같다.

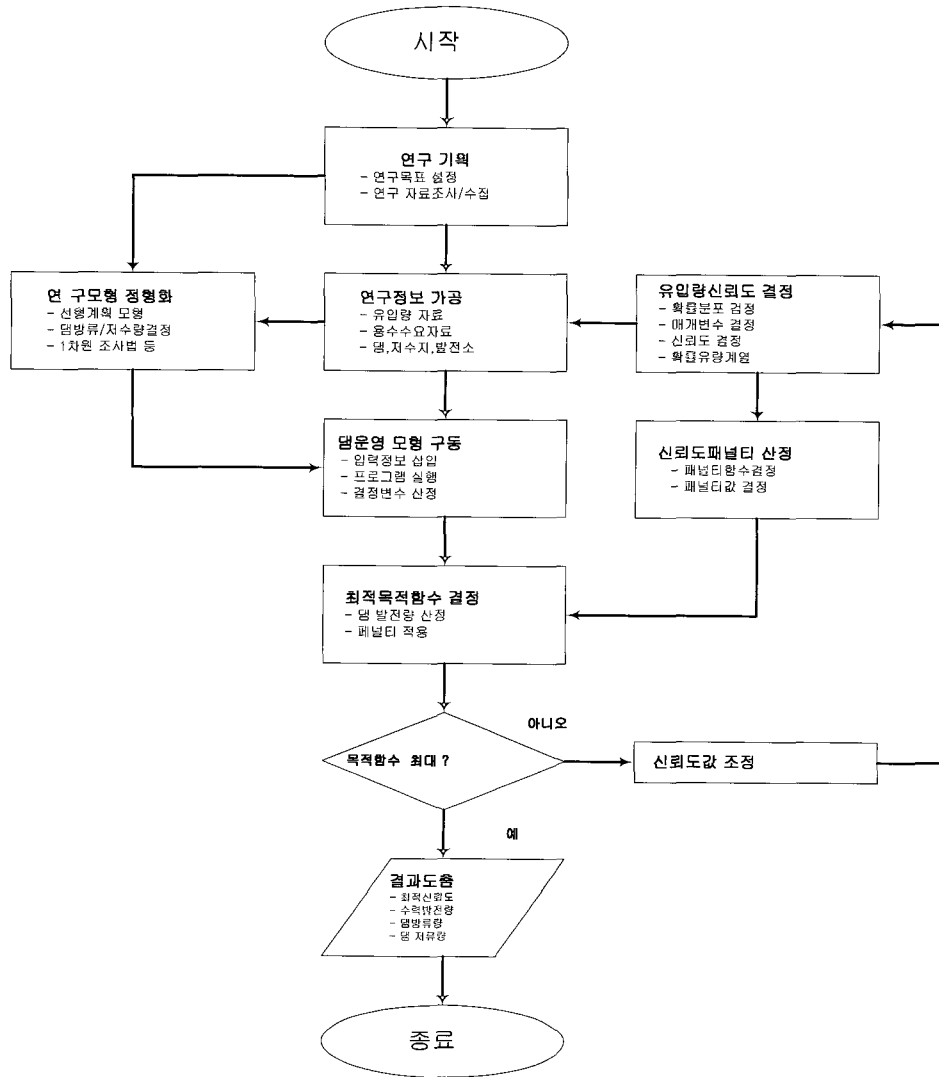


그림 1. 연구 흐름

2.1 댐운영 목표

금강수계 상류에 위치한 용담다목적댐은 하류의 하천유지용수를 5m³/s 를 최우선 상시 공급하고 이를 통하여 제 2발전소에서는 수력발전을 생산하고 전주권으로 유역 전환 용수공급량 15.7 m³/s 만큼을 상시 발전하면서 공급하는 계획으로 운영되고 있다. 공급량이 충족되면 잉여자원은 댐 하류 쪽으로 공급하도록 설계되어 있다. 즉 댐 하류의 하천유지용수를 기본적으로 충족시키고 유역 전환되도록 설계된 전주권 용수를 최우선 공급하고 용수 공급량을 제 1발전소와 제 2발전소에서 발전 방류하여 부가적으로 발전수익을 얻고 있다. 따라서 용담댐 발전소에서 공급 계약이 가능한 최적 발전량은 댐설계 특성을 고려하여 용수공급 최대화를 운영 목표로 두고 최적 수력발전량과 유입량 신뢰도를 평가하였다.

2.2 댐운영 모형

본 연구 목표를 달성하기 위해서 용수공급을 최대화하는데 선형계획 모형을 적용하였고 용수공급 최대화된 발전치에 유입량의 신뢰도가 떨어지는 벌칙값을 합제한 목적함수를 최대화하는데 1차원 조사법을 적용하였다.

2.2.1 저수지 시스템 구성

용담댐 저수지 시스템은 다음 그림 2와 같이 모식화할 수 있다. 이 때 I_1 는 댐의 유입량을 나타내고 R_1 은 댐 하류 방류량으로 제 2발전소를 통하여 발전 방류하고 RR_1 은 댐 용수공급량으로 제 1 발전소를 통하여 만경강 유역으로 유역전환되어 발전 방류한다. QD_1 은 하류 용수 공급량이고 $SPILL_1$ 은 하류 여수로 방류량이다.

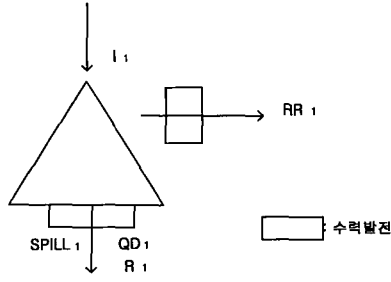


그림 2. 용담다목적댐 시스템

2.2.2 최적화 모형

(1) 목적함수

신뢰도별 유입량에 대한 저수량과 용수를 최대화한 발전량과 신뢰도를 벗어난 페널티의 합계를 1차적으로 최대화하도록 월별 방류량을 결정하고 발전량을 계산하도록 (1)과 같이 목적함수를 설정하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Max}_{\alpha} [PR\{\text{Max}(\sum_{j=1}^J C_1 S(j) + C_2(j) QD_1(j) \\ & + C_3(j) R_1(j) + C_4(j) RR_1(j) \\ & + C_5(j) SPILL_1(j))\} + l(\alpha)] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $S(j)$ 는 j 단계 저류량(MCM), $QD_1(j)$ 는 하류 용수공급량(MCM), $R_1(j)$ 는 하류 발전 방류량(MCM), $RR_1(j)$ 는 유역 전환 공급량(MCM), $SPILL_1(j)$ 는 하류 여수로 방류량(MCM)이고, PR 은 발전량 함수(MWH), C_1 은 저수에 대한 상대적 우선순위 가중치이고, C_2, C_3, C_4, C_5 는 각 공급량의 우선권을 나타내는 가중치 계수이다. 이때 j 는 저수지 조작 시간 축의 위치이고 α 는 유입량에 대한 신뢰도로서 0과 1사이 값이다.

(2) 제약조건

제약조건식 (2)의 좌변항은 저류방정식을 구성하는 유입량 I_j 이고 이때 $F_j(I)$ 는 유입량의 초과확률 함수로서 어떤 유입량(I_j)을 보장할 수 있는 신뢰도를 나타낸다. 따라서 초과확률이 α 인 유량을 I_j 라고 하면, $\alpha = F_j(I)$ 에서 F 에 대한 역함수를 F^{-1} 라고 하면 $I_j = F_j^{-1}(\alpha)$ 이다. 그러므로 단위 기간별 유입량을 주어진 신뢰도의 추계학적 유량으로 나타내면 식 (2)와

같다. 식 (3)은 저수지의 상시만수위(NHWL)과 저수위(LWL)에 해당하는 저수량의 제약조건이고, 식 (4)는 저수지 하류 방류량의 제약이고 식 (5)는 하류발전 방류량으로 하류유지용수이다. 식 (6)은 유역 전환 용수공급량의 제약식이다. 식 (7)은 최대 제약은 여수로 또는 하도 통수능력을 나타낸다.

$$\begin{aligned} & S(j+1) - S(j) + QD_1(j) + R_1(j) + RR_1(j) \\ & + SPILL_1(j) + L(j) = F^{-1}_j(\alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

$$S_{\min} \leq S(j) \leq S_{\max} \quad (3)$$

$$0 \leq QD_1(j) \leq QD_{1\max} \quad (4)$$

$$R_{1\min}(j) \leq R_1(j) \leq R_{1\max} \quad (5)$$

$$0 \leq RR_1(j) \leq DR \quad (6)$$

$$0 \leq SPILL_1(j) \leq SPILL_{1\max} \quad (7)$$

$$0 \leq \alpha \leq 1.0 \quad (8)$$

여기서, S 는 저수지 저류용량이고, S_{\max} 는 저수지 최대 저류용량, S_{\min} 는 저수지 최소 저류용량, $R_{1\max}$ 는 저수지 최대방류량, $R_{1\min}$ 는 저수지 하류 책임방류량으로 하천유지용수이고, RR_1 는 저수지의 직접취수량, L 은 증발 등의 저수지 손실량, DR 는 용수 수요량, $QD_{1\max}$ 는 하류공급관로 용량, $SPILL_{1\max}$ 는 여수로 방류 능력 등을 각각 나타내고, α 는 유입량의 신뢰도이다.

2.3 해법 및 프로그램

용수공급 최대화는 다음 식 (9)~(11)과 같은 선형계획(linear programming) 모형을 작성하고 범용되는 심플렉스 알고리즘을 이용하여 푸는 상용화된 계산 모듈을 이용하였다.

$$\text{MAX} C^T X \quad (9)$$

$$\text{st. } AX = B \quad (10)$$

$$0 \leq X \leq X_{\max} \quad (11)$$

이 때 C 는 공급 우선권을 나타내는 편익계수이고 X 는 저류량과 하류 용수공급량, 유역 전환 공급량, 여수로 방류량 등을 포함하는 결정 벡터이다. 그리고 A 는 용담댐의 시스템의 특성을 나타내는 상태 변환 행렬이고 B 는 유입량 등을 나타내는 벡터이다. 식 (11)은 결정변수의 제약조건을 나타낸다.

한편 신뢰도 유입량 별로 선형계획 모형을 통하여 용수공급을 최대화한 다음 수력 발전량을 계산하고 이때 신뢰도(α) 별로 페널티 함수 $l(\alpha)$ 를 적용하였다. 이를 식으로 나타내면 다음 식 (12)와 같다. 여기서 PR 은 발전함수를 나타낸다. 신뢰도를 벗어나는 페널티 함수는 대수함수를 적용하였다(권오현과 유주환, 1993).

$$\text{Max}_{\alpha} [PR(\text{Max}C^T X) - l(\alpha)] \quad (12)$$

이 모형은 선형계획 모형의 최적치로부터 발전량을 계산하고 이에 신뢰도별 페널티 함수를 적용하여 1차원 조사법(1 dimensional search)을 통하여 최대치를 찾도록 하였다.

2.4 모형 입력자료

2.4.1 유입량

댐지점 유출량은 용담댐 상류의 용수 수요량으로 인하여 소모량이 포함되어 있다. 그런데 댐 유역은 산림과 농지가 주요 부분을 차지하고 있는 상태로서 토지이용 변화가 다소 있긴 하지만 변화율이 작고 있다할지라도 토지별 물 소모량이 작으므로 수위표 지점 또는 댐지점 실제 유출량을 댐운명을 위한 이수 자료로 활용하여도 안전측이 될 수 있다. 이 때문에 유입량 적용치는 용담 수위표의 수위자료와 수위-유량곡선(rating curve)를 이용하여 다음과 같이 적용하였다.

(1) 유출량 산정

용담댐 지점의 유입량은 댐 건설 전엔 수위표 지점의 유출분석을 통하여 얻을 수 있다. 이때 수위표 지점의 유출량은 수위-유량곡선으로부터 얻을 수 있으며 기왕의 성과를 검토하여 적용하였다. 일반적으로 수위-유량곡선은 낮은 수위일 때는 단면지배(section control)가

크게 영향을 주므로 경년적인 변화가 있을 수 있으나, 높은 수위에서는 하도통제(channel control) 때문에 하도 경사가 주요 인자가 되므로 이를 고려한 수위-유량곡선을 작성해야 한다(유주환, 1999). 또한 유량을 산정하기 위한 수위자료의 검증 또는 보정이 수행되어야 한다. 한편 용담 수위표는 수위표 근처의 유량측정자료에 의하여 1992년 전까지 수위-유량곡선을 이용하여 유출 분석이 되었지만 댐 건설이 진행되면서 수위표 지점에서 유량이 측정되지 않아서 수위-유량곡선이 작성되지 않았다. 본 연구에서는 댐 건설당시 댐 건설지점 하류에서 측정된 유량측정 성과(한국수자원공사, 1995-2000)에 의한 수위-유량 곡선을 이용하여 1993년부터 2000년까지 유출량을 산정하였다. 그리고 1992년 이전의 유출 자료는 수위표 유출량을 유역면적으로 환산하여 산정하였다.

(2) 유입량 신뢰도

본 모형에 적용하기 위한 신뢰도별 유입량은 1년 주기로 순환되는 확률 유량의 월단위 계열로 입력된다. 적용한 유입량은 기 분석(김주철 등, 2002)을 통하여 검토한 후 적용하였다. 여기서 수위유량 곡선으로부터 계산된 일별 유량을 누계하여 월별 유량으로 환산하고 1963년부터 2000년까지 38년간의 유량을 산출하여 월별 확률 매개변수를 결정하였다. 그리고 확률 분포함수를 표준정규분포, 대수정규분포, 2변수감마분포 등 3개 분포에 대하여 계급구간 7개로 적합도 검정을 한 결과 2월, 3월, 8월말 2변수 감마분포 유의수준 5%에서 채택하였고 그 밖에 모든 달은 대수정규분포로 채택하였다.

2.4.2 용수수요

저수지 조작 목표 연도별로 물 수요의 총량도 중요하지만, 특히 용수수요의 시간 변화 양상은 저수지 조작에 주요 입력 변수이다. 이때 용수수요 총량은 기존 성과를 검토하여 목표 연도별로 추정될 수 있고 공급 패턴은 실적 통계 자료로부터 계절별 시간 변동을 추출할 수 있으나 본 연구에서는 댐 설계 자료를 적용하였다. 전주권 용수 수요의 월별 패턴은 표 1(한국수자원공사, 1990)과 같고 설계 당시 공급지역의 생활, 산업, 기후 특성 등이 반영된 수치이다.

표 1. 전주권 월별 용수 수요비

1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
0.0781	0.0729	0.0806	0.0805	0.0849	0.0847	0.0892	0.0926	0.0863	0.0857	0.0805	0.0840

2.4.3 댐, 저수지와 발전소 특성 및 제약

용담다목적댐 관련 자료는 기존 댐 계획 및 설계지 (건설부, 1989 ; 한국수자원공사, 1990 ; 1991 ; 한국건설기술연구원, 1996)를 적용하였다.

(1) 저수지 및 발전소

저수지에서 홍수위(FWL), 상시만수위(NHWL), 제한수위(RWL), 저수위(LWL)등 저수지 용량의 배분은 제약조건으로서 매우 중요하다. 이러한 제원은 설계 수치는 표 2와 같다. 저수지 곡선(수위-수면적-저류용량)은 저수지 조작성의 기본 자료로서 한국수자원공사 관리 자료 및 설계 자료를 이용하였다. 그리고 발전 사용수량(turbine discharge), 발전기 설치 대수, 정격사용수량 및 낙차, 수차 및 발전기 효율, 방수위 관계 등으로 관

리 또는 설계 자료를 적용하였다.

(2) 댐 및 하천의 수리, 수문학적 제약

홍수 문제와는 달리 댐의 여수로 방류 능력은 표 3과 같이 설계 여수로 방류량으로 장기간(long term)의 이수 프로그램에서는 문제가 되지 않는다. 특히 댐 하류부 통수 능력에 문제가 예상되는 경우에는 최대 방류 능력을 설정한다. 단지 용담댐 도수터널 방향의 도수능력은 최대 사용수량이 될 수 있다. 댐하류 하천의 환경생태학적 기능과 이수적인 갈수량 공급 기능을 유지하도록 하기 위한 최소유량을 공급하기 위해서 댐하류로 공급해야 할 하천유지유량을 설정한다. 본 연구에서는 표 3과 같이 기설정된 값을 적용한다.

표 2. 댐 및 발전소 자료

구 분	단 위	규격		
		제1발전소	제2발전소	
발전시설	Mw×대수	11.05×2	1.15×2	
정격낙차	m	147.1	46.0	
정격사용수량	m ³ /s	17.6	6.2	
손실수두	m	27	3.75	
발전최저수위	EL. M	222.0	228.5	
수차효율	%	97	89	
발전기효율	%		92	
낙 차	총 낙차	m	-	59.2
	최대유효	m×1대 / m×2대	-	57.85 / 56.10
	정격유효	m×1대 / m×2대	147	48.64 / 46.0
	최저	m×1대 / m×2대	-	31.35 / 29.60
방수위	EL. M	71.0	205.0	
발전시간	hr	24	24	
홍수위	EL. M		265.5	
만수위	EL. M		263.5	
제한수위	EL. M		261.5	
저수위	EL. M		228.5	
여수로정	EL. M		252.8	
마루표고	EL. M		268.5	
총저수용량	106m ³		815	
유효저수용량	106m ³		672	
사수용량	106m ³		70	
댐높이	m		70	
마루길이	m		498	

표 3. 수리, 수문적 제약

구 분	단 위	규격	
		하류	도수터널
최대방류량	m ³ /s	3.21	23.8
	106m ³ /일	0.28	2.1
하천유지용수	m ³ /s	5.0	
	106m ³ /일	0.432	

2.4.4 공급 우선순위

본 연구에서 댐의 공급 우선순위는 선형계획 모형에서 목적함수의 편익계수(C)로 반영된다. 공급우선 순위는 표 4와 같이 적용하였다. 여기서 편익계수는 절대적인 편익으로부터 산출된 것은 아니고 단지 상대적인 적용치이다. R_1 은 하류유지용 방류량으로 제 2발전소를 통하여 발전방류하는 것으로 최우선이고 RR_1 은 유역전환되는 공급량으로서 제 1발전소를 통하여 발전 방류하여 공급하는 것으로 그 다음 공급순위이고 QD_1 은 댐하류 잉여 용수공급량으로 그 후 순위가 된다. 이와 같이 용수공급에 우선 가중치를 두고 다음 저수량에 가중치를 부여하였다. 그리고 댐 여수로 방류량 $SPILL_1$ 은 되도록 발생되지 않도록 하기 위하여 우선순위가 낮음과 동시에 음수로 하였다. 이는 용수공급량과 저수량을 동시에 가중 최대화함으로써 용수뿐 아니라 저수위도 최대화하여 발전 포텐셜 또한 극대화될 수 있도록 한 것이다.

3. 연구결과 분석 및 검토

본 연구의 선행 연구로서 대청다목적댐의 평가(권오현과 유주환, 1993)를 통하여 유입량, 저수지 운영, 다각적인 매개변수 및 민감도 분석을 수행하여 발표하고 제시한 바 있다. 본 연구에서는 용담댐 최적운영을 통하여 확률 유량과 극한 갈수기 유량에 대하여 최적 발전량을 평가하고 최적 유입량 신뢰도를 제시하였다. 이때 분석된 확률 유량은 99% 유량, 갈수량, 저수량, 평수

량, 풍수량, 홍수량과 1967-1968년 유량, 1994-1995년 유량 등을 포함하였다.

3.1 신뢰도별 댐유입량

신뢰도별 유입량은 그림 3과 같다. 제시된 확률은 이 수적 신뢰도 수준을 나타낸다. 극한 갈수년 유량 계열(67/68년, 94/95년)은 신뢰도 유량과 패턴이 다름을 알 수 있고 이때 표시된 확률 값은 연간 총량의 신뢰도 수준이다.

3.2 신뢰도별 저수지 수위

그림 4는 유입량 신뢰도에 따라 연평균 저수량을 나타내는 것으로 신뢰도 값이 클수록 고수위 상태가 유지됨을 보여준다. 그림 5는 신뢰도별 월 저수위 패턴으로 4월~6월에 저수위가 다소 낮아지는 것을 보여준다. 이는 마지막 수위를 고정하여 용수를 공급하도록 운영하였기 때문이다.

3.3 신뢰도별 댐 방류/공급량

그림 6은 유역 전환하는 발전 방류량을 나타낸다. 갈수기 유입량일 때 운영 마지막 수위를 맞추기 위해서는 용수가 공급되지 못하는 것을 보여준다. 그림 7은 하류 방향 하천유지와 발전 수량으로 갈수시 공급되는 못하는 상황을 보여준다. 그리고 그림 8은 하류에 공급되는 잉여 수량으로서 유역전환 용수공급 후에도 하류쪽으로 공급 가능한 여유를 보여준다.

표 4. 댐 공급별 우선순위

표기	R_1	RR_1	QD_1	S	$SPILL_1$
설명 구분	하류유지/발전	유역전환공급/발전	댐하류방류	저수량	여수로방류
우선 순위	1	2	3	3	5
적용값(C)	5.0	4.5	1.0	0.1	-5.0

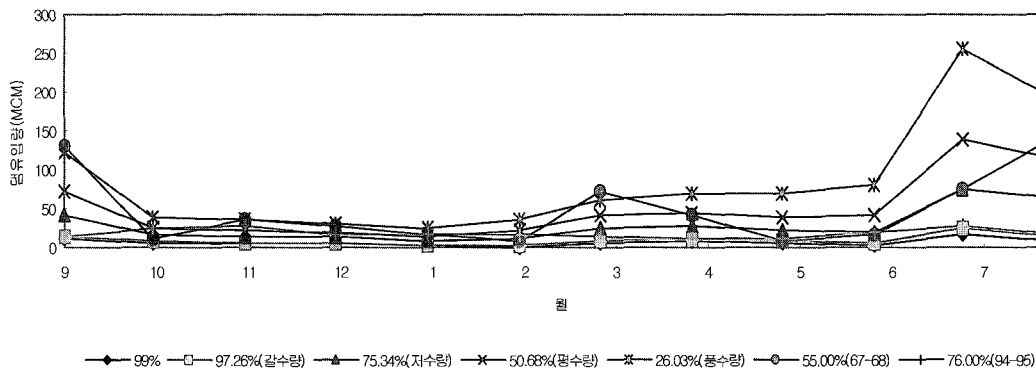


그림 3. 신뢰도별 댐유입량

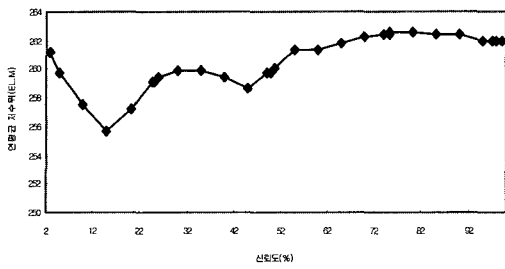


그림 4. 신뢰도별 연간 수위

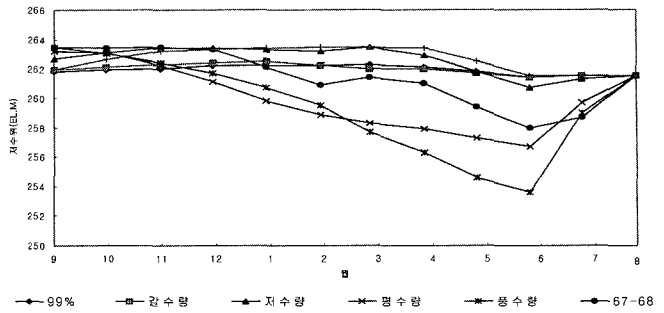


그림 5. 월별 수위 패턴

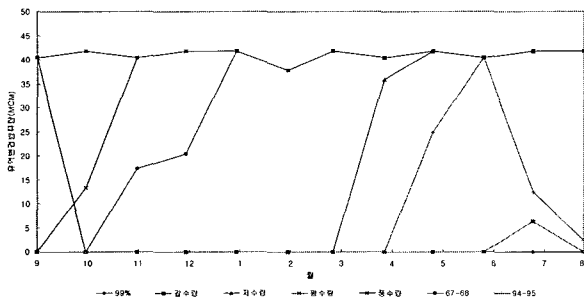


그림 6. 유역전환 공급량

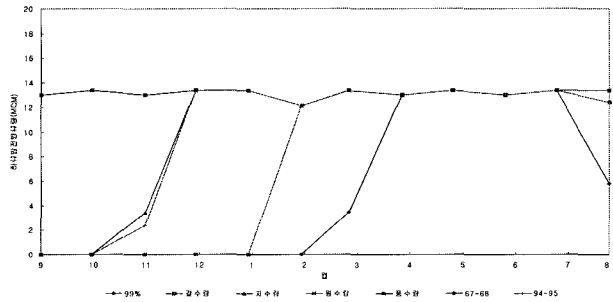


그림 7. 하류하천유지/발전 방류량

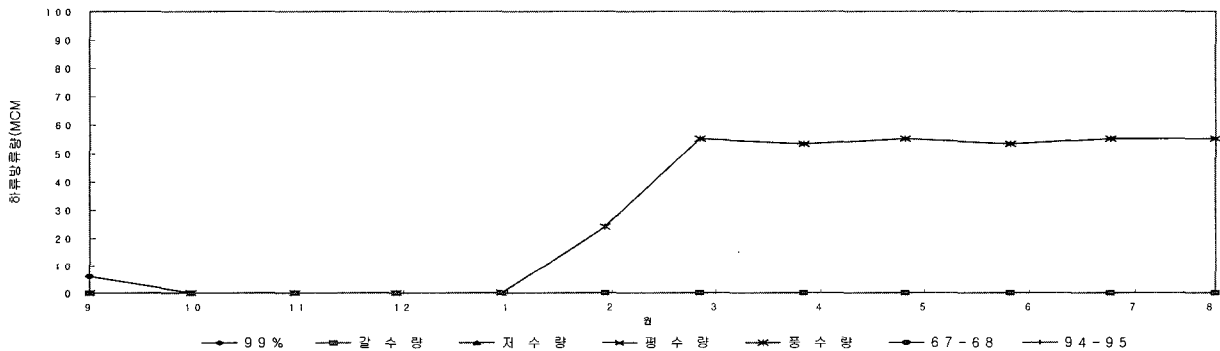


그림 8. 하류 추가 공급가능량

3.4 신뢰도별 발전량

그림 9는 제 1 발전소의 신뢰도별 월별 발전량 추이를 보여준다. 유입량이 풍수량일 경우 전월 모두 발전하는 것을 보여주는 반면에 갈수량일 경우에는 7월 외에는 발전하지 못함을 보여준다. 그림 10은 제 2발전소를 통하여 얻은 월별 발전량이다. 갈수기에도 하류유지 방류량을 최우선 공급하면서 발전하는 것을 보여준다.

3.5 신뢰도별 댐유출입량

그림 11은 댐유입량이 신뢰도에 따라 작아지는 것을 보여준다. 댐 유출량에는 하류 방류량과 유역전환 방류

량이 있다. 하류 방류량은 발전 방류량, 추가 하류방류량, 여수로 방류량으로 구분하였다. 하류 발전 방류량은 하천유지를 위해서 최우선 공급하는 것을 보여주고 유역전환 공급량은 신뢰도 50% 정도부터 공급이 감소되는 것을 보여준다. 또한 하류에 추가 공급은 40%이하가 될 때 가능한 것을 보여준다.

3.6 신뢰도별 발전소별 발전량

그림 12와 같이 제 2발전소는 하천유지용수 공급으로 발전하는 것을 보여주고 제 2발전소는 유입량 신뢰도 45% 이후부터 감소되어 50% 이상에서 발전량이 점차 감소됨을 보여준다.

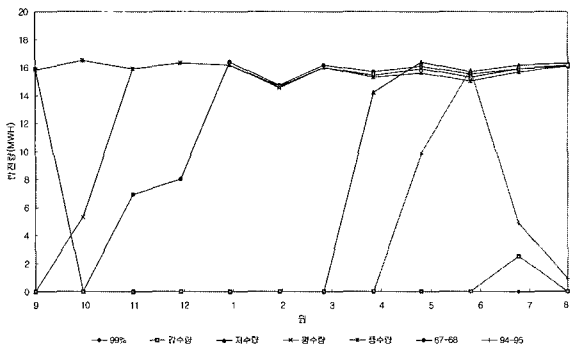


그림 9. 제1발전소 월별 발전량

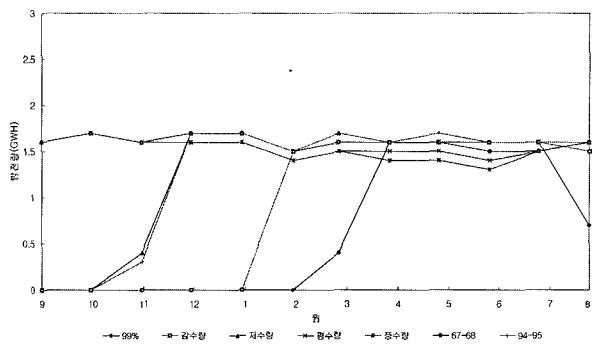


그림 10. 제2발전소 월별 발전량

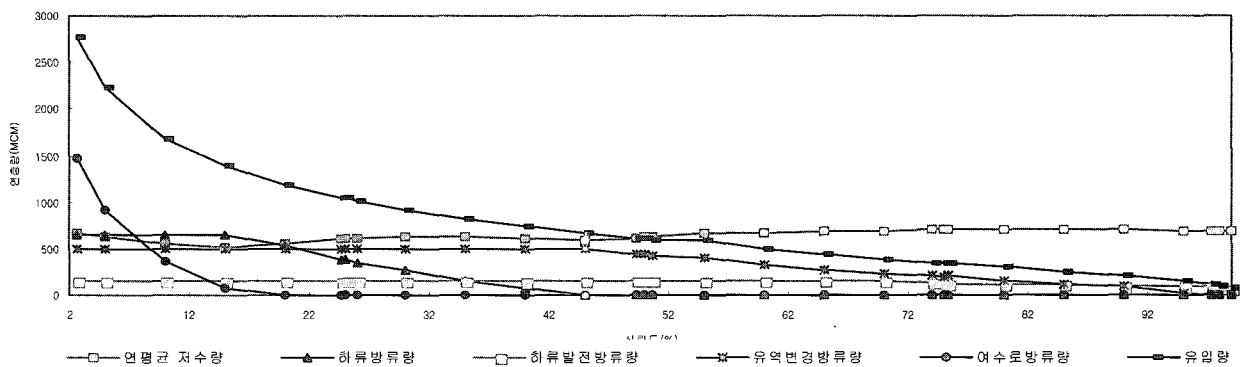


그림 11. 신뢰도별 댐유출입 총괄

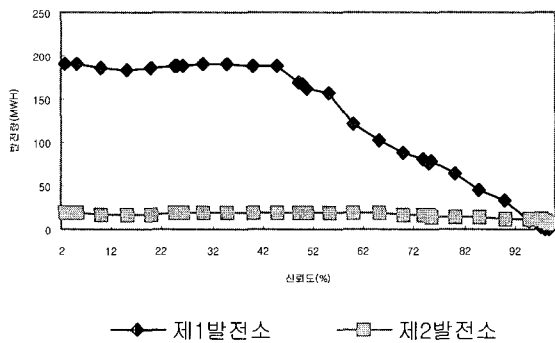


그림 12. 신뢰도별 발전소별 발전량

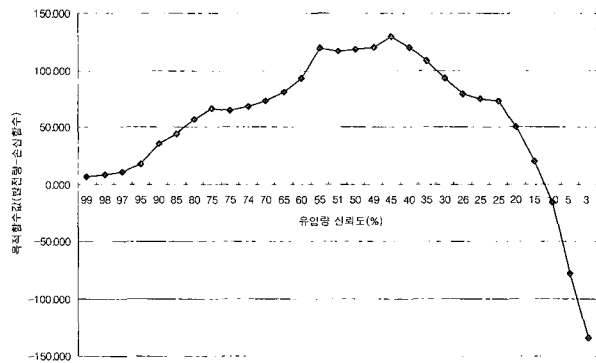


그림 13. 유입량 최적치 결정

3.7 최적 신뢰도 결정

댐의 최적 운영을 신뢰도별로 수행하고 신뢰도에 따른 페널티 함수를 적용하면 발전량과 페널티 함수 값의 차이는 최적 신뢰도를 찾기 위한 또 하나의 1차원 최적 목적함수가 된다. 그런데 그림 13에서 보는 바와 같이 1차원적인 조사로 최대치를 찾을 수 있다. 그림 13과

표 5에서 보는 바와 같이 유입량의 신뢰도가 45% 일 때 최적 발전량은 206 GWh 생산하는 것으로 평가되었다. 이 결과는 신뢰도 값이 크면 유입량이 적기 때문에 발전량이 적고 신뢰도 값이 작으면 유입량은 크지만 큰 페널티를 물기 때문에 중간부에서 최적치가 결정된 것을 보여준다.

표 5. 최적 운영 결과(최적 신뢰도 45%)

월	수위	유입량	하류방류	하류발전	유역전환	여수로	제1 발전소	제2발전소	발전합계
	[EL.M]	[MCM]	[MCM]	[MCM]	[MCM]	[MCM]	[GWH]	[GWH]	[GWH]
9	262.3	80.5	0	13.0	40.4	0	15.8	1.6	17.4
10	261.4	28.2	0	13.4	41.8	0	16.3	1.6	17.9
11	260.5	25.1	0	13.0	40.4	0	15.7	1.5	17.2
12	259.4	22.0	0	13.4	41.8	0	16.1	1.6	17.7
1	258.1	16.7	0	13.4	41.8	0	16.0	1.5	17.5
2	257.1	24.6	0	12.1	37.7	0	14.3	1.3	15.6
3	256.7	44.4	0	13.4	41.8	0	15.8	1.5	17.3
4	256.4	49.2	0	13.0	40.4	0	15.2	1.4	16.6
5	255.9	43.3	0	13.4	41.8	0	15.7	1.5	17.2
6	255.6	47.2	0	13.0	40.4	0	15.2	1.4	16.6
7	259.4	159.6	0	13.4	41.8	0	15.9	1.5	17.4
8	261.5	129.3	5.5	13.4	41.8	0	16.2	1.6	17.8
연간	258.7	670.2	5.5	157.7	492.0	0	188.1	18.0	206.1

4. 주요 결과 및 결론

본 연구의 주요 결과 및 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 용담다목적댐 유입량은 이수적 측면의 신뢰도 유량과 갈수기 유량을 적용하였다.
- (2) 용담다목적댐의 운영 목표에 적합한 최적 모형을 정형화하였다. 댐 운영은 1년간 월 단위로 신뢰도 유입량을 적용하고 마지막 수위를 만수위로 하여 운영하였다.
- (3) 댐 운영 모형은 용수공급과 저수량을 동시에 가중치를 두어 최대화하는 선형계획을 이용하였고 페널티 함수를 적용한 발전 목적함수는 1차원 조사법을 이용하여 최적치를 결정하였다.
- (4) 연구 결과, 유입량의 신뢰도가 45% 정도보다 커질 때부터 유입량이 감소됨에 따라 만경강 유역으로 전환되는 공급량이 감소되기 시작한다.
- (5) 그리고 전력 수급 계약에 최적 유입량 신뢰도는 45%으로 나타났고 이때 공급량은 206 GWH로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2001-000-01367-0) 지원으로 수행되어 사의를 표합니다.

참고 문헌

건설부 (1989). 전주권 2단계지역 개발사업 타당성조사 용담수원개발 방안조사 보고서.

권오현, 유주환 (1993). “저수지 유입량의 신뢰도를 고려한 최적계약 전력량의 결정.” 대한토목학회논문집, 제13권, 제2호, pp. 141-149.

김주철, 유주환, 김재한, 정관수 (2002). “금강수계 다목적 저수지 유입량의 신뢰도 분석.” 한국수자원학회 학술발표논문집, pp. 733-738.

안태진, 류희정, 박정웅 (1999). “최적화기법을 이용한 기존 농업용 저수지에서의 부존 수력발전량 추정.” 한국수자원학회논문집, 제32권, 제3호, pp. 281-289.

유주환 (1999). “금강수계 수위-유량곡선 개발 및 적용.” 대한토목학회논문집, 제19권, 제II-6호, pp. 665-675.

유주환, 김재한, 정관수 (1999). “한강수계 복합저수지 시스템의 최적 수력발전운영을 위한 Linear Tracking의 적용.” 한국수자원학회논문집, 제32권, 제5호, pp. 579-591.

유주환, 박창근, 조효섭 (2001). “평화의 댐 홍수지체 효과에 따른 화천댐 계통 이수 능력의 증대에 대한 검토.” 한국수자원학회논문집, 제34권, 제6호, pp. 617-625.

한국건설기술연구원 (1996). 수자원장기종합계획(1997-2001) 부록 수자원자료집.

한국수자원공사 (1990). 용담다목적댐 타당성조사보고서, 건설부.

한국수자원공사 (1991). 용담다목적댐 건설사업 실시 설계 보고서, 건설부.

한국수자원공사 (1995-2000). 용담다목적댐 건설 업무 자료집, 용담댐건설단.

Askew, A.J. (1974a). “Optimum reservoir operating

- policies and the imposition of a reliability constraint." *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 1, pp. 51-56.
- Askew, A.J. (1974b). "Chance-constrained dynamic programming and the optimization of water resource systems." *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 6, pp. 1099-1106.
- Askew, A.J. (1975). "Use of risk premium in chance-constrained dynamic programming." *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 6, pp. 862-866.
- Colomi, A. and Fronza, G. (1976). "Reservoir management via reliability programming." *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 1, pp. 85-88.
- Lee, Han-Lin and Brill, E.D. (1987). *Reliability of reservoir operation under hydrologic uncertainty*. Water Resources Center, University of Illinois at Urbana Champaign, Research Report, No. 207.
- ReVelle, C., Joeres, E. and Kirby, W. (1969). "The linear decision rule in reservoir management and design, 1. development of the stochastic model." *Water Resources Research*, Vol. 5, No. 4, pp. 767-777.
- Simonovic, S.P. and Murrino, M.A. (1980). "Reliability programming in reservoir management 1. single multipurpose reservoir." *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 5, pp. 844-848.
- (논문번호:04-71/접수:2004.07.16/심사완료:2004.12.24)