

## 최적화기법을 이용한 기존 농업용 저수지에서의 부존 수력발전량 추정

### Optimization Technique for Estimation of Potential Hydroelectric Energy at Existing Agricultural Reservoir

안 태 진\* / 류 희 정\*\* / 박 정 응\*\*\*

Ahn, Tae Jin / Lyu, Heui Jeong / Park, Jung Eung

#### Abstract

Small-scale hydropower projects at existing agricultural reservoirs can contribute to produce electric energy by maximizing the use of releases from the reservoirs. The irrigation water duration, the reservoir hydropower simulation, and the nonlinear programming model are employed to estimate potential hydroelectric energy at an existing reservoir. The nonlinear programming model consists of finding a maximum hydroelectric energy subject to irrigation water demand constraints. The sample reservoir given a set of inflow and irrigation water is considered. The optimal solutions by the optimization model yield the most hydroelectric energy for the analysis period in the three methods. Consequently, the nonlinear programming model uses the most water for hydropower generation with respect to the total inflow of the sample reservoir. It is also found that additional storage by increasing the normal water level of the sample reservoir does not significantly increase the annual hydroelectric energy for the given reservoir. It is expected that the optimization model and the proposed procedure for estimating potential hydroelectric energy can be applied to evaluate feasibility analysis for small scale hydropower additions at existing agricultural dams.

*Keywords:* hydroelectric energy, irrigation water duration, reservoir hydropower simulation, optimization model

#### 요 지

기존 농업용 댐에서의 소수력발전 사업은 기존 저수지로부터의 방류량을 효율적으로 이용함으로써 전력의 추가 확보에 기여할 수 있다. 본 연구에서는 기존 농업용 댐에서의 부존 수력발전량을 추정하기 위하여 관개용수를 근거로 한 관개수량의 유황, 저수지 발전모의운영 및 비선형계획 모형을 적용하여 기존 농업용 저수지에서의 부존 수력발전량을 추정하였다. 비선형계획법은 소요관개용수 제약조건아래 최대발전량을 찾는 것으로 하였다. 유입량과 관개용수량이 주어진 표본 저수지에서, 채택된 방법 중 최적화 모형의 최적해에 의한 발전량이 가장 많았으며 저수지의 유입량에 관한 발전용수도 최적화모형이 가장 많이 사용하였음을 알 수 있었다. 저수지 관리수위 상승으로 확보되는 저수량에 따른 발전량의 변화를 분석하기 위하여 연평균발전량을 추정한 결과, 관리수위 증가에 의한 발전량의 증가는 미미함을 알 수 있었다. 본 연구에서 제안한 부존발전량 추정 절차와 최적화 모형은 기존 농업용댐의 부존 발전량 추정에 적용할 수 있으며, 소수력발전 사업 경제성분석에 필요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어 :** 수력발전, 관개수량 유황, 저수지 발전모의운영, 최적화모형

\* 환경대학교 토목공학과 조교수

Asst. Prof. Dept. of Civil Engrg., HanKyong National Univ., Ansong, Kyonggi 456-749, Korea

\*\* 환경대학교 토목공학과 교수

Prof. Dept. of Civil Engrg., HanKyong National Univ., Ansong, Kyonggi 456-749, Korea

\*\*\* 서울산업대학교 토목공학과 교수

Prof. Dept. of Civil Engrg., Seoul National University of Technology, Seoul, 139-743, Korea

## 1. 서 론

에너지 자립도 향상 및 대체에너지 개발을 위하여 소수력 개발을 적극 지원하여 수 개소 소수력발전소가 민간주도로 건설되어 운영되고 있다. 농업용 댐에서의 소수력 개발은 전북 완주군에 대야발전소(3,000kW)와 경북 문경시에 경천발전소(800kW)가 있고, 관개 용수로에 발전시설을 설치한 전북 정읍군에 동진발전소(2,000kW) 등이 있다. 농업용 댐은 당초 건설 목적이 관개용수 공급에 있으므로 관개용수를 우선으로 하여 최대한 발전할 수 있도록 하여야 한다. 농업용 댐에서의 소수력 발전소는 주로 관개기간인 5월에서 9월까지 운영되므로 소수력 발전 계획시 부존발전량과 발전소의 설비용량(installed capacity)을 합리적으로 추정하여야 기존 농업용댐에서 소수력발전 사업의 경제성 분석이 가능할 것이다.

농림부(1993)의 농업기반조성사업 통계년보에 의하면 농업용수 수원공 중 시군이 관리하고 있는 소규모 댐의 수는 15,412개소이고, 농지개발조합에서 관리하고 있는 중소규모 댐의 수는 2,898개소이며 댐의 기능은 주로 관개용수를 공급함과 동시에 소규모 홍수조절 기능을 갖고 있다. 농어촌진흥공사(1996)은 소수력 발전의 입지적인 조건이 되는 댐 높이 20m 이상인 농업용 댐의 수는 전국에 535개소 산재되어 있다고 조사하였다.

일반적으로 모의운영은 저수지의 설계제원과 운영지침을 평가하는데 이용되며 확률변수의 유무에 따라 확정론적모형(deterministic model)과 추계학적모형(stochastic model)으로 구분된다. 최적화기법은 저수지의 목적과 제약조건에 따라 저수지의 설계제원과 운영지침을 결정하는데 이용되며 모형에 따라 선형계획법(linear programming), 동적계획법(dynamic programming), 비선형계획법(nonlinear programming) 등이 있다.

저수지의 최적화 모형에서 유량과 수두의 곱이 되어 비선형으로 표시되는 수력발전량이 포함되어 있어 비선형모형이 된다. 선형계획법을 적용하여 비선형모형을 해석하기 위하여 수두고정법(fixed head linearization), Taylor급수 근사법(Taylor series approximation), separable programming, 축차선형계획법(successive linear programming) 등으로 선형화하였다. Loucks 등(1981), Trezos와 Yeh(1988)은 수력발전량을 수두고정법으로 선형화하

고 선형계획법으로 해석하였다. Ellis와 ReVelle(1988), Can 등(1982)은 separable programming을 적용하였고, Grygier와 Stedinger(1983), Martin(1987) 및 이규탁 등(1995)은 축차선형계획법을 적용하였다. 이재웅 등(1995)과 Turgeon(1987)은 Mixed integer linear programming을 적용하였다. Becker와 Yeh(1974), Giles와 Wunderlich(1981), Allen와 Bridgeman(1986) 등은 동적계획법을 적용하였으나 동적계획법에서는 단계 변수(stage variable)의 수가 많아 질수록 계산시간이 엄청나게 소요되는 단점이 있다. 비선형모형에서 목적함수가 convex이고 제약조건으로 구성되는 분석가능영역이 convex이면 국지해(local solution)는 곧 전체최적해(global solution)이다. 그러나 유량과 수두차로 표현되는 수력발전량은 nonconvex이고 nonseparable 함수이다. 따라서 많은 알고리즘이 제시된 비선형계획인 수력발전을 위한 최적화 모형으로부터 얻은 국지해는 전체최적해(global optimum)를 보증하지는 못한다. 비선형계획법의 해석을 위한 알고리즘의 부류는 주로 Lagrangian multiplier법, iterative linearization법, penalty function법을 적용하였다. Chu와 Yeh(1978), Simonovic와 Marino(1980)는 비선형계획법으로 표현한 모형을 해석하였다. 윤용남 등(1995)은 비선형계획법을 Frank-Wolfe법을 적용하여 해석하였다. 이상과 같은 연구는 주로 대규모 다목적 댐에서의 저수지 설계 및 운영에 관한 것이다.

임의 하천 지점에서 run-of-river 수력발전 계획시 유출수문자료로부터 추정할 수 있는 유량지속곡선(flow duration curve)을 적용하여 그 지점에서의 개략적인 부존 수력발전량과 설비용량을 결정할 수 있다. 이때 유출자료가 없는 유역에서는 간접적인 방법으로 부존 수력발전량과 설비용량을 결정한다. 저류용 댐(storage dam)에서의 부존 수력발전량은 통상 저수지 모의운영을 통하여 추정한다.

본 연구에서는 기존 농업용 댐에서 소수력 발전 사업의 경제성 분석시, 수익으로 되는 부존 수력발전량(potential hydroelectric energy)을 관개수량을 근거로한 유량지속곡선, 저수지 발전량 모의운영, 비선형계획 모형으로 추정하고자 한다. 또한 기존 댐의 여수로 구조개선에 의하여 증가되는 저수량에 의한 부존 수력발전량을 추정하고자 한다.

## 2. 수학적 모형

임의 저수지에서 임의기간내 수력발전량은 시설용량, 수차에 통과하는 유량, 평균유효수두, 가동시간, 발전효율 등에 영향을 받는다. 부존 수력발전량을 추정하기 위하여 목적함수와 제약조건식으로 표현되는 최적화모형은 저수지의 이용 목적에 따라 다양한 제약조건식이 첨가된다. 우리나라 농업용 저수지에서 적용할 수 있는 수학적인 모형을 다음과 같이 정리하였다.

$$\text{모형 1: Maximize } \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^T B_i H_{i,t} R_{i,t} \Delta t \quad (1)$$

Subject to

$$S_{i,t+1} - S_{i,t} + R_{i,t} + Lo_{i,t} + W_{i,t} = I_{i,t} \quad (2)$$

$$Q_{k,t} - f(R_{i,t}) = 0 \quad (3)$$

$$H_{i,t} - f(S_{i,t}, S_{i,t+1}) = 0 \quad (4)$$

$$R_{\min i,t} \leq R_{i,t} \leq R_{\max i} \quad (5)$$

$$Q_{\min k} \leq Q_{k,t} \leq Q_{\max k} \quad (6)$$

$$S_{\min i} \leq S_{i,t} \leq S_{\max i} \quad (7)$$

$$H_{i,t}, S_{i,t}, R_{i,t}, W_{i,t}, I_{i,t}, Q_{k,t} \geq 0$$

여기서

$S_{i,t}$  =  $i$  저수지에서 기간  $t$  의 시작시 저수량

$R_{i,t}$  =  $i$  저수지에서 기간  $t$  동안의 발전용수량

$W_{i,t}$  =  $i$  저수지에서 기간  $t$  동안의 여유로블  
통한 방류량

$Lo_{i,t}$  =  $i$  저수지에서 기간  $t$  동안의 증발 및  
침투에 의한 손실량

$Q_{k,t}$  = 기간  $t$  동안 각 저수지 사이의 하천구  
간에서의 유량

$I_{i,t}$  = 기간  $t$  동안  $i$  저수지로 유입하는 유량

$H_{i,t}$  = 기간  $t$  의 시작시  $i$  저수지에서 방수로  
부터의 수두

$R_{\min i,t}$  =  $i$  저수지에서 기간  $t$  의 최소방류량

$R_{\max i}$  =  $i$  저수지에서의 최대방류량

$Q_{\min t}$  = 저수지 사이의  $t$  하류구간에서의 하

용최소유량

$Q_{\max t}$  = 저수지 사이의  $t$  하류구간에서의 하  
용최대유량

$S_{\min i}$  =  $i$  저수지에서의 최소저수량

$S_{\max i}$  =  $i$  저수지에서의 최대저수량

$\Delta t$  = 시간간격

$B_i$  =  $i$  저수지에서 수력발전함에 대한 계수:

$$B_i = B_1 B_2$$

$B_1$  = 단위전력편익(원/kWh)

$B_2$  = 발전효율을 포함한 단위환산계수

$t$  = 시간 지표

$k$  = 하천구간 지표

$i$  = 저수지 지표

위 모형에서 식 (1)은 수력발전에 의한 편익, 식 (2)는 저수지에서 연속방정식, 식 (3)은 저수지사이에 하류구간에서의 하도추적식, 식 (4)는 저수지에서의 수위-저수량 관계식, 식 (5)에서 식 (7)은 변수의 한계를 표시한 것이다. 농업용 저수지에서 최소방류량은 임의 기간  $t$  동안 소요관개수량보다 같거나 커야한다.

## 3. 부존 수력발전량 추정 및 고찰

### 3.1 표본지구 개요

농업용 저수지에서의 부존 수력발전량을 추정하기 위하여 경북 문경시 동로면에 소재한 경천저수지를 표본 저수지로 선택하였다. 경천저수지는 농업용 저수지로서 1990년에 준공되었으며, 계획 당시 저수지 모의운명을 통하여 저수지 유효저수량을 결정하였다. 저수지 모의운영에서 유입량은 Kajiyama 유출고 공식을 적용하였고, 관개용수량은 Blancy - Criddle 공식을 이용하여 결정하였다. Kajiyama 공식에서 유역의 유출특성계수는 0.8, 답에서의 삼투량은 일 6.0mm, 수로 손실은 15%으로 하였다. 경천 저수지 관련자료는 표 1과 같다. 한편 경천저수지 관개용수를 이용하여 전력을 발전하기 위하여 시설용량 800kW 수력발전소가 경천수력단에 의하여 1995년에 준공되었으며, 경천발

표 1. 경천저수지 관련 내역

유역면적 (ha)	관개면적 (ha)	유효저수량 (ha-m)	재방높이 (m)	만수위 (El. m)	시수위 (El. m)	방수위 (El. m)	한발빈도 (년)	비 고
9,150.0	3,133.5	2,720.0	63.5	228.5	191.5	190.0	10	

전소는 400kW 용량 2기를 설치하고 1기의 최대사용 수량을 1.82m<sup>3</sup>/s로 하여 총 최대사용수량은 3.64 m<sup>3</sup>/s로 하였다.

### 3.2 관개수량의 유향에 의한 부존수력발전량

농업용댐은 관개용수 공급이 우선이므로 취수탑과 연결된 수력시설은 근본적으로 관개용수를 이용해야 한다. 농업용댐에서 관개용수나 수위조절용 방류량을 모두 사용하기 위한 대규모 발전 시설의 설치는 비경제적이다. 관개용수량이 발전용 최대사용수량을 초과하는 수량은 발전용수로 사용되지 않고 직접 용수로에 방류되며, 강우기에 관개용수량을 초과하는 잉여수량은 발전용수로 사용하거나 여수로에 의하여 방류된다. 그러므로 발전소의 적절한 설계유량의 결정은 수력시설 경제 분석에 매우 중요하다. 본 연구에서는 소수력 시설용량 결정을 위하여 경천저수지 설계시 적용한 관개용수량 추정방법과 관련인자를 적용하였다. 1967년부터 1997년까지 순별로 관개용수량을 추정하고 관개용수를 근거로 한 관개수량의 유향(irrigation water

duration)을 표 2에 나타내었다. 관개수량 유향은 경천저수지의 순별 방류량의 빈도와 순별 방류량의 크기를 표시한 것이다. 또한 경천저수지에서 1995년부터 1997년까지 취수탑으로 배제된 일방류기록을 이용한 유향(flow duration)을 표 2에 나타내었다.

미개척국(USBR, 1976)은 수압관의 길이가 최대수두의 3배보다 작은 경우 손실수두는 정격수두(rated head)의 1%이내이고, 그 이상인 경우에는 정격수두의 3-10% 정도라 하였다. 미공병단(USACE, 1985)은 설계수두(design head)는 저수지 평균수위와 유사한 것으로 하였다. 시설용량 결정을 위한 저수지 평균수위는 저수지 모의운영 기간 저수지 수위를 평균한 EI. 225.0m로 결정하였으며, 손실수두는 평균수두의 10%로 하였다. 미공병단 설계편람을 이용하여 유향곡선을 근거로 한 적절한 시설용량과 설계유량 등을 계산한 결과는 표 3과 같다.

일반적으로 저수지로부터의 유량지속곡선과 저수지가 없을 경우의 유량지속곡선을 비교하면 저수지는 큰 유입량은 작게, 작은 유입량은 크게 조절하므로 저수지

표 2. 경천저수지 관개수량의 유향

초과백분율(%)	99	90	80	70	60	50	40	30	20	10	1	기 간
순별관개수량 (m <sup>3</sup> /s)	0.03	0.13	0.19	0.51	1.92	2.63	3.21	4.04	4.84	6.01	7.44	'67-'97
일별방류량 (m <sup>3</sup> /s)	0.17	1.07	2.35	2.77	3.42	4.23	5.07	5.53	5.78	6.66	7.20	'95-'97

표 3. 유향곡선에 의한 발전소 시설용량과 연평균발전량

	산출 방법	순별 관개유량		일별방류량	
		1 unit	2 unit	1 unit	2 unit
최대유량 (m <sup>3</sup> /s)	유향곡선에서 20%초과백분율에 해당하는 유량	4.84	2.42/unit	5.78	2.89/unit
설계유량 (m <sup>3</sup> /s)	최대유량/1.15	4.21	2.10/unit	5.03	2.51/unit
최소유량 (m <sup>3</sup> /s)	설계유량×0.3	1.26	0.63/unit	1.51	0.75/unit
시설용량 (kW)	9.8(설계유량)(발전효율 : 0.85) (평균수두 : 225.0 190.0)(유효수두율 : 0.9)	1,100	550/unit	1,300	650/unit
연평균유량 (m <sup>3</sup> /s)	유향곡선에서 최대유량과 최소유량내의 평균유량	2.35	2.39	3.77	3.84
연평균발전량 (MWh)	9.8(연평균유량)(0.85)(225.0-190.0)(0.9) (24hr)(160days)	2,367.9	2,408.1	3,798.6	3,869.1
연간가동율	연평균발전량/(24hr · 160days · 시설용량)	0.56	0.57	0.76	0.78

건설 전후의 유량지속곡선의 형태는 상당히 변화된다. 표 3에서 보는 바와 같이 순별관개수량 계산치와 일별 방류량 관측치에 의한 연평균발전량은 수차(turbine)가 1대(1 unit)인 경우나 2대(2 unit)인 경우나 별 차이가 없음을 알 수 있다. 일반적으로 동일한 유량을 이용하여 작성한 순별 유량 유휴곡선과 일별 유휴곡선을 비교하면, 순별 유휴곡선이 일별 유휴곡선보다 완만하여 순별 유휴곡선에 의한 연평균발전량이 과다평가 되는 경우가 많다. 그러나 표 3의 결과는 일별방류량 유휴곡선에 의한 연평균발전량이 순별관개수량인 경우보다 많음을 알 수 있다. 이는 일별방류량은 경천저수지로부터의 관측치이고, 순별관개수량은 간접적인 방법인 계산치에 기인한 것이나, 순별관개수량은 21개년의 계산 결과이고 일별방류량은 3개년의 관측결과이므로 단순히 비교하고자 한 것이다.

### 3.3 저수지 모의운영 및 최적화 모형의 해석

일반적으로 관개기에는 관개용수를 이용하여 발전하고 비관개기에는 관리수위 이상의 잉여수량을 발전용수로 이용하며, 임의 기간내 소요 관개수량이 최대발전용수량을 초과할 때는 취수탑으로부터 방류량을 용수로에 직접 연결하여 부족한 관개수량을 공급한다. 일반적으로 농업용 저수지에서 수력발전은 주로 관개기(5월-9월)에 운영되며 비관개기(10월-4월)에는 다음 연도의 관개를 위하여 미리 설정한 저수위 이상일 때만 운영된다. 표본 저수지인 경천저수지는 단일저수지이므로 모형 1을 다음 모형 2로 정립하였다.

$$\text{모형 2: Maximize : } \sum_{t=1}^T B_t H_t R_t \Delta t \quad (8)$$

Subject to

$$S_{t+1} - S_t + R_t + W_t = I_t \quad (9)$$

$$H_t - f(S_t, S_{t+1}) = 0 \quad (10)$$

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (11)$$

$$R_{\min,t} \leq R_t \leq R_{\max} \quad (12)$$

$$H_t, S_t, R_t, W_t, I_t \geq 0$$

위 모형에서 식 (8)은 수력발전량, 식 (9)는 저수지에서 연속방정식, 식 (10)은 저수지에서의 수위-저수용량 관계식, 식 (11)과 식 (12)는 변수의 한계를 표시한 것이다. 유입량과 관개용수량을 일별로 추정하여 모형 2에 입력하면 결과의 신뢰도가 제고될 수 있으나, 우리나라 농업용 저수지 설계시 순별로 추정한 유입량

과 관개용수량을 적용하고 있어 본 연구에서는 시간간격  $t$ 를 10일로 하였다.

농업용 저수지에서의 부존 수력발전량을 추정하기 위하여 모형 2와 같이 저수지내 연속방정식, 관개용수 제약조건 등을 만족시키며 분석기간내 총발전량을 최대화하는 것으로 하였다. 식 (8)에서 발전수량의 단위를  $10^6 m^3$ 로 하면, 순별 발전량은 MWh단위로 되어 다음과 같은 식 (13)이 된다.

$$E_t = 9.81 \cdot \eta \cdot R_t \cdot H_t (0.9) / 3.6 \quad (13) \\ = 2.084625 \cdot R_t \cdot H_t$$

식 (13)에서 발전효율  $\eta$ 는 0.85, 유효수두는 미개척국(USBR, 1976)에서 제시한 바와 같이 총수두의 10%가 손실되는 것으로 하였다. 최적화모형을 해석하기 위하여 필요한 순별유입량 및 순별관개용수는 경천저수지 계획시에 적용한 Kajiyama 유출고 공식과 Blaney - Criddle 공식을 이용하여 결정하였다. 식 (12)의 최대방류량은 발전용 최대사용용량으로 3.2절에서 결정된  $4.84 m^3/s$ 로 하였고 최소방류량은 순별 소요관개용수로 하여 관개용수 공급을 우선으로 하였다. 관개용수가 발전용 최대사용수량보다 작으면 취수탑에서 방류된 수량은 발전소를 통하여 발전용수로 이용된 후, 용수로에 공급된다. 관개용수가 발전용 최대사용수량을 초과하는 수량은 발전용수로 사용하지 않고 직접 용수로로 통하여 관개면적에 공급하는 것으로 하였다. 소요관개용수가 적으나 유입량이 많은 우기에는 저수지 수위 조절을 위하여 취수탑과 연결된 발전소에서 발전용수로 사용한 후, 하류하천에 직접 방류하거나 용수로에 공급하며, 발전용수 외 잉여수는 여수로를 통하여 방류함으로써 수위조절을 한다. 미개척국(USBR, 1976)과 미공병단(USACE, 1985)은 수차의 최대수두는 설계수두의 125%, 최소수두는 설계수두의 65% 정도를 추천하고 있다. 따라서 최대수두는 방수로 표고 190m와 관리수위 표고 228.5m의 차이인 38.5m로 하였고 최소수두는 표고 210.2m인 20.2m로 하였다. 식 (10)의 수위-저수용량 관계식은 경천저수지 수위별 저수용량 자료를 이용하여 식 (14)와 같이 유도하여 적용하였다.

$$S = 0.74346H - 5.755 \quad (14)$$

식 (14)에서 H는 방수로의 수위를 기준으로 한 총수두이고, S는 저수용량이다.

모형 2와 같은 nonconvex 문제의 국지해(local

optimum)를 해석하는 GAMS/MINOS version 2.25를 이용하여 모형 2를 해석하였다. GAMS/MINOS는 목적함수가 비선형이고 제약조건식이 선형이면 quasi-Newton algorithm과 reduced - gradient algorithm을 조합하여 해석하며, 목적함수가 비선형이고 제약조건식이 비선형이면 projected Lagrangian algorithm으로 해석한다. 1977년부터 1997년까지 21년간 순별로 수립된 모형의 규모는 결정변수가 3,024개로, 행의 수는 1,513이고 열의 수는 3,025이나 GAMS/MINOS version 2.25는 정립한 비선형계획 모형을 용이하게 해석하였다.

경전저수지 설계 당시와 동일한 조건으로 저수지 모의운영을 실행함으로써 얻은 순별 유입량 및 순별 필요 관개용수를 이용한 모형 2를 실행한 결과, 모형 2는 최소방류량 제약조건인 순별 필요관개용수를 충족시키지 못하여 불능해(infeasible solution)이었다. 기존 농업용 댐의 유효저수용량은 10년 빈도 한발 기준으로 이미 결정되어 있는 상태이므로 최적화 모형내 임의 연도의 임의 순에서 유입량과 관개용수량이 한발기준을 초과할 때, 최적화 모형이 불능해가 되는 것은 당연하다. 즉 한정된 저수용량과 적은 유입량으로는 필요한 관개용수량을 공급할 수 없으므로 그 연도의 특정 순에서는 한발을 피할 수 없는 것이다. 이 경우 GAMS/MINOS는 순별 필요관개용수를 해석 가능(feasible solution)하도록 수정하여 모형 2를 실행하였다. 모형 2를 해석한 결과 연평균부존발전량은 3,825.1MWh/yr이었고, 관개기간 동안 연평균부존발전량은 2,981.4MWh/yr이었다.

저수지 발전 모의운영에서 임의기간 동안 물수지는 식 (2)와 같이 호내 유입량, 방류량 및 저수량의 변화와의 관계로 표현할 수 있다. 경전저수지 설계 당시 호내 순별 유입량과 방류량인 순별 관개용수량의 결정 방법은 3.1절에서 기술한 바와 같으며, 각종 수문인자는 설계 당시와 동일하게 두었다. 최적화 모형에서와 같이 발전용 최대사용유량은  $4.84\text{m}^3/\text{s}$ 로 하였고, 최소사용유량은 최적화 모형에서 해석가능해로 수정된 순별관개용수량으로 저수지 발전모의운영을 실시하였다. 저수지 발전 모의운영 결과, 연간 평균부존발전량은 3,380.8MWh/yr이었고, 관개기간 동안 연평균 부존발전량은 2,587.6MWh/yr이었으며 표 4에 그 분석 결과를 나타내었다. 한편 문경시에 소재하고 있는 경전저수지의 소수력 발전시설을 참고하면, 시설용량은 800kW이고 1996년과 1997년의 발전량은 각각

2,330.58MWh, 2,562.0MWh이었다(경천수력단; 1996, 1997).

표 4에서 보는 바와 같이 최적화 모형에서 분석기간 21년 동안 저수지의 유입량의 91.8%, 관개기간에는 72.5%가 발전용으로 이용되었으며, 저수지 발전모의 운영에서는 21년 동안 유입량의 76.3%, 관개기간에는 61.2%가 발전용으로 이용되어 최적화모형이 발전용수를 많이 사용하였음을 알 수 있다.

대부분 중규모 농업용저수지의 설계기준은 10년빈도 한발에 대비하는 것으로, 이 기준에 부합되도록 유효저수량을 결정해왔다. 기존 농업용 댐에서 효율적인 수자원 이용 측면에서 볼 때 댐의 보강 개발의 방법은 여러가지 제시되어 왔다. 저수지의 내한 능력을 제고하기 위한 방법으로 1) 저수지내 준설, 2) 기존 댐의 덧쌓기, 3) 보조저수지의 설치, 4) 여수로 구조개선, 5) 댐 누수부의 차수, 6) 취수시설의 개보수 등이 있으나 본 연구에서는 비용이 적게 소요되는 여수로 구조개선시 증가되는 저수량의 수자원 이용을 주로 부존 수력발전량 추정에 중점을 두고자 한다. 농업용 댐의 여수로는 주로 자연 월류식이므로 제방 높이에 여유가 있고 만수면적이 큰 저수지에 자연 월류식 여수로가 설치되어 있다면 기존 여수로에 자동수문(높이 1m이하) 등을 설치하여 저수량을 증가시킬 수 있다. 물론 여수로 구조개선으로 인한 저수량 증가에 따른 홍수위와 제방안정에 관한 재검토가 되어야 한다. 현재는 주로 흙가마니, 모래주머니, 각낙판 등을 설치하여 저수위를 0.3~0.5m 정도 높여 이용하고 있으나 홍수 월류시 거의 유실되어 홍수 후에 다시 설치하고 있다. 저수지의 수위-저수량 곡선의 특성상 높이 1m정도의 자동수문 설치로 인한 저수량의 증가량은 총저수량의 10~15% 정도로 추정되고 있다. 신규 댐의 설치는 여러가지 문제점으로 인하여 어려워지고 있는 현실에 비취 볼 때 기존 댐의 여수로 구조개선에 의한 수자원의 추가 확보는 매우 바람직하다고 판단된다.

저수지 구조개선에 의한 저수량 추가확보에 의한 발전량의 변화를 분석하기 위하여 모형 2에서 현재 경전저수지의 관리수위를 0.5m 또는 1.0m를 상승시키고 GAMS/MINOS에 의하여 연평균발전량을 추정한 결과, 0.5m 상승시에는 3,879.9MWh/yr로서 현재 관리수위로 운영하는 경우의 발전량 3,825.1MWh/yr와 비교하면 1.4% 발전량이 증가하고, 1.0m 상승시에는 3,934.7MWh/yr로서 2.9% 발전량이 증가한다. 이 결과로 보면 소요관개수량은 그대로 한 조건에서 관리수

표 4. 비선형계획 모형과 저수지 발전모의운영에 의한 연도별 발전량

연 도	저수지 발전 모의운영				비선형계획 모형				총관개용수량 (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	총유입량 (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
	전기간		관개기간		전기간		관개기간			
	발전량 (MWh)	발전수량 (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	발전량 (MWh)	발전수량 (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	발전량 (MWh)	발전수량 (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	발전량 (MWh)	발전수량 (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )		
1977	2,799.8	44.39	2,320.0	38.42	912.7	31.61	912.7	31.61	42.29	40.52
1978	2,682.4	36.41	2,473.6	33.81	2,996.5	44.17	2,787.6	41.57	31.68	64.79
1979	4,180.1	53.88	2,896.1	37.88	4,232.5	55.85	2,860.5	38.75	34.59	55.85
1980	4,349.5	48.56	3,341.2	42.15	4,715.6	64.27	3,707.4	51.71	21.56	72.09
1981	3,154.6	41.75	2,193.4	29.78	3,538.9	47.29	2,511.4	34.49	33.30	47.30
1982	921.4	24.32	599.9	20.31	2,784.1	38.61	2,130.4	30.46	39.06	38.61
1983	3,275.3	48.56	2,637.2	40.60	4,584.8	62.09	3,433.1	47.73	31.82	62.07
1984	4,495.3	61.43	3,284.4	46.34	4,847.9	66.08	3,624.1	50.83	34.04	70.84
1985	4,953.1	64.84	3,483.2	46.52	5,146.5	69.97	4,324.4	51.65	32.12	89.41
1986	4,035.8	52.14	2,824.9	37.05	4,378.7	57.68	3,167.7	42.59	33.49	57.69
1987	4,009.3	51.75	2,937.9	38.40	4,211.2	60.09	3,139.8	46.75	25.24	81.57
1988	2,979.5	38.11	2,547.6	34.75	3,101.9	48.06	2,832.1	44.69	39.49	46.27
1989	3,370.1	47.84	2,843.6	38.59	3,666.1	56.72	2,797.6	45.89	32.63	62.62
1990	3,921.4	42.82	3,128.3	41.49	4,314.8	63.60	3,374.0	51.42	32.03	68.02
1991	4,352.0	56.07	2,939.7	40.86	4,380.4	59.58	3,160.3	44.37	29.07	62.11
1992	3,772.9	50.96	2,386.6	33.69	4,377.9	59.64	3,442.1	41.89	34.50	59.82
1993	4,166.0	57.22	3,148.3	44.53	4,765.3	66.59	3,747.4	53.91	25.93	79.72
1994	2,174.8	33.99	1,893.2	30.43	2,474.5	35.98	2,028.4	30.43	43.95	35.98
1995	1,412.3	28.35	1,047.1	23.81	2,945.6	46.71	2,254.9	38.11	36.21	56.02
1996	3,393.9	48.34	2,816.3	41.14	3,774.4	62.16	3,106.3	53.76	37.79	61.56
1997	2,597.8	35.87	2,596.9	35.87	4,176.7	68.18	3,267.5	47.37	34.79	55.53
합 계		967.6		776.42		1,164.93		919.98	705.58	1,268.39
총유입량이용율 (%)		76.3		61.2		91.8		72.5		
연평균발전량 (MWh)	3,380.8		2,587.6		3,825.1		2,981.4			

\* 관개기간 동안 사용수량은 관개용수량과 방류량을 합한 것임

위 증가에 의한 발전량의 증가는 크게 기대할 수 없을 것임을 알 수 있다. 농업용저수지는 관개용수가 우선이므로 관개용수 방류 빈도에 따라 결정된 최대발전수량으로 말미암아 발전용수량의 증가에는 한계가 있다. 즉, 표 5과 같이 비선형계획에 의한 기존 경천댐에서의 총유입량 이용율은 91.8%이므로 관리수위 증가에 따른 발전용수이용율의 제고는 한계가 있음을 알 수 있다. 그러나 기존 댐의 여수로 구조개선에 의한 저수량의 추가 확보는 수자원 이용의 신뢰도를 제고할 것이다. 즉, 10년 빈도 한발에 대비한 기존의 저수량을 약

10-15% 증가시킴으로써 농업용수의 내한 능력을 제고하고, 하천유지수량의 안정화에 기여할 수 있으나 발전량의 증가는 미미함을 알 수 있다.

위의 분석 내용을 근거로 하여 기존 농업용댐에서 최적화모형과 저수지 발전모의운영에 의한 부존수력발전량을 추정하는 절차를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 관개수량 추정 및 관개수량 유휴 결정
- (2) 관개수량유휴에 의한 시설용량과 수차의 최대, 설계 및 최소유량 결정
- (3) 저수지 모의운영 결과에 의한 평균수위와 최대,

표 5. 관리수위 증가에 따른 발전량 변화

현재 관리수위		관리수위 0.5m 상승		관리수위 1.0m 상승		총관개수량 (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	총유입량 (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
연평균발전량, MWh/yr	발전수량 (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	연평균발전량, MWh/yr	발전수량 (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	연평균발전량, MWh/yr	발전수량 (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )		
3,825.1	1,164.93	3,879.9	1,166.91	3,934.7	1,167.76	705.58	1,268.39
총유입량 이용율(%)	91.8		92.0		92.1		

설계 및 최소수두 결정

(4) 최적화 모형에 의한 기간별 방류량 결정 및 부존수력발전량 추정

(5) 결정된 방류량을 적용한 저수지 발전모의운영에 의한 부존수력발전량 결정

#### 4. 결 론

기존 농업용댐으로부터의 부존 수력발전량 추정에 있어서 가장 중요한 것은 유역으로부터의 유출량과 관계면적에서 필요로 하는 관개수량의 합리적인 결정이다. 순별관개수량에 의한 유형과 추정된 발전량을 이용하여 경천저수지의 시설용량을 평가하면 기존 800kW 보다 큰 1,100kW이 타당한 것으로 판단되며, 시설용량을 400kW 1기를 추가 설치한다면 현재보다 많은 발전을 할 수 있을 것이다. 기존 농업용댐에서 저수지 발전모의운영에 의한 연평균부존발전량 3,380.8MWh/yr 보다 최적화모형에 의한 연평균부존발전량 3,825.1 MWh/yr이 더 많았으며, 저수지내 총유입량에 관한 발전용수 이용율은 저수지 발전모의운영에서 76.3%, 최적화모형에서 91.8%로서 최적화모형에서 발전용수 이용율이 높았음을 알 수 있다. 실제 '96년도 발전실적 2,330.58MWh과 '97년도 발전실적 2,562.0 MWh을 최적화모형에 의한 결과인 연평균발전량 3,825MWh/yr에 단순히 비교하면 약 60%에 해당된다.

기존의 방법인 저수지 발전모의운영에서는 관계면적에 공급될 계산된 관개용수가 모두 공급되는 것으로 가정하고 연평균발전량을 추정하는 반면, 본 연구의 최적화 모형은 순별 필요관개용수를 충족시키지 못할 때는 해석 가능한 순별관개용수를 제시함으로써 추정된 연평균발전량에 대한 신뢰도가 높다고 할 수 있다. 저수지의 여수로 구조개선에 의한 저수량 추가확보에 의한 발전량의 변화를 분석하기 위하여 현재 관리수위를 기준으로 0.5m 상승시, 현재 관리수위로 운영하는 경우의 발전량과 비교하면 1.4% 발전량이 증가하고, 1.0m 상승시에는 2.9% 발전량이 증가한다. 이 결과로

보면 관리수위 증가에 의한 발전량의 증가는 크게 기대할 수 없음을 알 수 있다. 본 연구를 통하여 제안한 절차와 최적화모형은 소수력발전 사업 경제성분석에 필요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 1997년 한국학술진흥재단 공모과제 연구비(과제번호 : 1997-003-E00528)에 의하여 수행되었으며 지원에 감사드립니다. 또한 본 논문의 최종본이 나올 수 있도록 유익한 조언을 해주신 심사자들도 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

경천수력단 (1996, 1997). 경천수력발전소 발전실적지.

농림부 (1993). 농업기반조성사업 통계연보.

농어촌진흥공사 (1996). 농업용저수지의 소수력발전 이용에 관한 연구. 최종보고서.

이규탁, 권오현, 고석구 (1995). "추차선형계획기법에 의한 수력발전량의 최대화." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제15권 제5호. pp. 1343-1349.

이재용, 조원철, 허준행 (1995). "혼합정수프로그래밍을 이용한 유역 수력발전 단위 할당에 관한 연구." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제15권 제4호, pp. 917-928.

윤용남, 김중훈, 김태균 (1995). "최적화 모형을 이용한 수자원의 적정배분." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제15권 제4호. pp. 855-864.

Allen, R. B. and Bridgeman, S. G. (1986). "Dynamic programming in hydropower scheduling." *J. of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 12, No. 3, July, pp. 339-353.

Becker, L. and Yeh, W. W-G. (1974). "Optimization of real time operation of a



- multiple-reservoir System." *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 6, Dec., pp. 1107-1112.
- Can, E. K., Houck, M. H. and Toebes, G. H. (1982), "Optimal real-time reservoir systems operation." *Technical Report 150*, Purdue Univ. Water Resources Research Center, West Lafayette, Indiana.
- Chu, W. S. and Yeh, W. W-G. (1978). "A Nonlinear programming algorithm for real time hourly reservoir operations." *Water Resources Bulletin*, AWRA, Vol. 14, No. 5, pp. 1048-1063.
- Ellis, J. H. and ReVelle, C. S. (1988). "A Separable linear algorithm for hydropower System Operation." *Water Resources Bulletin*, AWRA, Vol. 24, No. 2, pp. 435-447.
- Giles, J. E. and Wunderlich, W. O. (1989). "Weekly multipurpose planning model for TVA reservoir system." *J. of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 107, No. WR2, pp. 491-511.
- Grygier, J. C. and Stedinger, J. R. (1985). "Algorithm for optimizing hydropower system operation." *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-10.
- Louck, D. P., Stedinger, J. A. and Haith, D. A. (1981). *Water Resources Systems Planning and Analysis*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1981, pp. 248-249.
- Martin, Quentin W. (1987). "Optimal daily operation of surface water system." *J. of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 113, No. 4, pp. 453-471.
- Simonovic, S. P. and Marino, M. A. (1980). "Reliability programming in reservoir management, single purpose reservoir." *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 16, pp. 844-848.
- Trezos, T. and Yeh, W. G. (1988). "Stochastic dynamic programming applied to multireservoir systems." *Computerized Decision Support Systems for Water Managers*, Labadie, et al., ed., ASCE, New York, N. Y., pp. 559-571.
- Turgeon, A. (1987). "An application of parametric mixed-integer linear programming to hydropower development." *Water Resources Research*, Vol. 23, No. 3, pp. 339-407.
- USBR. (1976). *Selecting hydraulic reaction turbines*, Engineering Monograph. No. 20.
- USACE. (1985). *Hydropower*, Engineering Manual, EM 1110-2-1701.

(논문번호:99) 9(7)집수:1999.02.03/심사완료:1999.04.29)