

## 貯水池 流入量의 信賴度를 고려한 最適 契約電力量의 決定

### Determination of the Optimal Contract Amount of the Hydropower Energy Considering the Reliabilities of Reservoir Inflows

權五憲\* · 柳朱桓\*\*

Kwon, Oh Hun · Yoo, Ju Hwan

#### Abstract

Production of hydro-energy is random in its output amount due to the characteristics of the reservoir inflows. Therefore, it is necessary to provide the rationality in determining the amount of energy for a supply contract. This study presents a methodology for determining reasonably reliable amount of the energy supply considering the energy sale-incomes associated with the penalties which are subject to inflow-reliabilities.

The objective function consists of the returns of energy sales and the risk-loss function to reflect statistically relevant risks. A range of the coefficient of the risk-loss function was figured out by its sensitivity analysis. The risk-loss herein means the penalty which should be paid by the energy supplier in case that the level of the energy supply is behind the contracted amount. And the reliability of reservoir inflow is defined by the exceedance probability of the inflow. The log-normal distribution was accepted as the probability density function of monthly inflows on the level of significance at 5%.

Golden-ratio searching was applied to identify the optimal reliability and Incremental Dynamic Programming was used to maximize generation of the hydro-power energy in reservoir operation. The algorithm was the applied to the Daechung multi-purpose reservoir and hydro-power plant system in order to verify its usefulness.

#### 요 지

수력에너지 생산량은 추계학적인 저수지 유입량에 지배되므로 전력량 판매계약에는 이를 반영하여 합리성을 보장해야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 유입량의 신뢰도별로 貯水池操作을 수행하여 최적 신뢰도 및 이에 따른 최적 전력 판매계약량을 결정하는 방법을 제시하였다. 목적함수에는 전력생산량이 신뢰도를 벗어나는 위험에 대한 손실함수를 도입하고, 손실계수의 범위를 제시하였다. 여기서 손실은 계약량을 공급하지 못할 경우 지불해야 할 벌칙량을 의미하고 신뢰도는 저수지 유입량에 대한 초과 확률과 같고, 이 때 확률밀도함수는 대수정규분포를 5% 유의수준에서 채택하였다.

최적의 신뢰도를 결정하기 위하여 오복함수 범위에서 황금비 조사 기법을 썼으며, 신뢰도별 최대 수력 에너지를 얻기 위해 증분 동적계획 기법으로 저수지 조작을 수행하였다. 본 연구의 적용대상으로 대청 다목적댐 및 수력발전소를 택하여 손실계수, 최적 신뢰도 및 계약 발전량을 구하였다.

\* 정희원 · 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 정희원 · 충남대학교 대학원 토목공학과 박사과정

# 1. 서론

현재 우리나라의 수력발전소는 생산한 전력을 韓國電力公社에 판매하고 있으며, 韓電은 생산실적에 따라 계약된 일정한 요금을 전력생산자에게 지불하고 있다. 그러나 이러한 매매계약에는 전력생산량의 추계학적 특성이 고려되지 않았으므로, 유입량에 따른 신뢰도를 바탕으로 하는 合理的인 계약전력량을 판단할 필요가 있다.

선진국형의 전력에너지의 수요와 공급에 있어서 전력에너지 가격은 負荷가 계절별로 크게 변동됨에 따라 差等的으로 적용될 것이고, 한편으로 전력생산자가 契約電力量을 공급하지 못하는 경우에는 적절한 벌칙금이 부과되어야 할 것이다.

이에 본 연구에서는 電力需給에 있어서 市場經濟의 원리가 적용되는 未來產業社會에 대비하여, 水力에너지 생산자의 입장에서 신뢰도에 따른 유입량에 대한 전력량의 最適契約供給量을 결정하는 방법을 제시하였다. 이 때 推計學的 성분인 저수지 유입량에 신뢰도를 부여하여, 신뢰도를 벗어나는 벌칙수준을 감안한 순 편익을 최대화 하는 신뢰도를 구하게 된다.

推計學的 모형의 意義는 수문학적인 불확실성 속에서 시간적, 공간적 또는 시간-공간적으로 상관성을 갖는 유하량의 推計學的 성질을 수학적 모형에 결부시키는데 있다.<sup>(1)</sup> 危險度(risk) 또는 信賴度(reliability)를 고려하지 않는 推計學的 저수지 조작 모형은 예측치 못할 높은 확률로 신뢰도를 벗어나 실패(failure)할 수 있다.<sup>(1)</sup> Askew<sup>(2,3,4)</sup>는 저수지 조작에 위험도 및 신뢰도를 고려하기 위해서 페널티 함수 접근법을 제안했는데 이 때 페널티를 변화시키며 저수지 시스템이 실패하는 확률을 조사하였다. Revelle 등<sup>(5)</sup>은 위험도를 포함하는 신뢰도 모형으로 선형결정문을 개발하여 저수지를 계획하는 방법을 제안하였다. 용수 공급 계약량을 공급하지 못하는 경우의 손실을 순편익과 조합한 확률계약 모형은 Colorni 등<sup>(6)</sup>이 제안했는데 이와 같은 확률계약 프로그램에서는 매개변수로 취급한 신뢰도에 대한 편익계수 및 손실함수의 민감도 분석이 중요하다.

전기에너지 생산에 관련된 신뢰도는 유입량 이외에 저수지 상태 및 방류량, 또는 생산 전력량 자체의

초과확률 분석으로 평가할 수 있을 것이다. 그러나 유입량 이외의 분석대상은 저수지 조작법의 지배를 받으므로 단기간 자료에서는 추계학적 특성이 손실되고, 또한 실적 통계 기간이 충분하지 못하여 확률분포형을 결정할 수 없는 실정이다. 그러므로 이 연구에서는 유입량의 신뢰도를 적용하였다.

# 2. 모형 설계

## 2.1 목적함수

본 연구에서는 신뢰도별 유입량에 대한 발전수입과 신뢰도를 벗어난 경우 손실함수(벌칙금)와의 差를 1 차적으로 최대화하도록 월별 방류량을 결정하였고, 2 차적으로 이 순편익이 최대화되는 신뢰도 값을 결정할 수 있도록 식 (1)과 같이 목적함수를 설정하였다. 전력수입과 손실함수의 차는 3.1에서 검토하는 바와 같이 실제적인 분석영역에서 아래로 오목(concave)하다고 합리적으로 가정할 수 있다. 그리고 발전수입과 손실함수는 신뢰도에 대한 민감도를 분석하여 미리 결정해야 한다.

$$\text{Max}_\alpha [\text{Max}_R [\sum_{j=1}^J \{C_1(j) \cdot E_1(j) + C_2(j) \cdot E_2(j)\} - I(\alpha)]] \quad (1)$$

여기서,

$E_1(j)$  : j 단계 동안의 1차 수력 에너지 (kWh)

[ $E_1 = C_3 \cdot \eta \cdot w \cdot R(j) \cdot H(j) \cdot T(j)$ ]

$\eta$  : 합성효율로서 발전기 및 수차효율의 곱임 (상수로 취급함).

$w$  : 물의 단위중량(9.81 KN/m<sup>3</sup>)

$R(j)$  : j 단계 중의 저수지 방류량(MCM)

$H(j)$  : j 단계 중의 평균 유효낙차로서 저수지 수위와 방수위 차에서 수리손실을 공제한 값임(m).

$T(j)$  : j 기간동안 기준 발전시간 이내의 1차 발전시간 수(hr)

$E_2(j)$  : j 단계동안 2차 수력 에너지로서 기준시간 이외의 발전량 (kWh)

$C_1(j), C_2(j)$  : 1 차 및 2 차 전력 수입에 대한 j월의 가중 계수

$C_3$  : 유입량(MCM)의 유량(m<sup>3</sup>/s) 단위 환산 계수

- $l(\alpha)$  : 신뢰도  $\alpha$ 에 따른 손실함수(2.3 참조)
- J : 시간축의 총 길이 단위 수
- j : 저수지 조작 시간 축의 위치
- $\alpha$  : 유입량에 대한 신뢰도(0, 1)

## 2.2 제약 조건

목적함수를 최적화하는 데는 다음과 같이 5 개의 제약조건식이 필요하다. 여기서 식 (2)의 좌변항은 저류방정식을 구성하는 유입량  $I_j$ 이고 이 때  $F_j(I)$ 는 유입량의 超過確率 함수로서 어떤 유입량( $I_j$ )을 보장할 수 있는 신뢰도를 나타낸다. 따라서 超過確率  $\alpha$ 인 유량을  $I_j$ 라고 하면,  $\alpha = F_j(I_j)$ 에서  $F_j$ 에 대한 역함수를  $F_j^{-1}$ 라고 하면  $I_j = F_j^{-1}(\alpha)$ 이다. 그러므로 단위 시간별 유입량을 주어진 신뢰도의 추계학적 유량으로 나타내면 식 (2)와 같다. 식 (3)은 저수지의 NHWL과 LWL에 상당하는 저수용량의 제약조건이고, 식 (4)는 저수지 하류방류량 제약식으로서 이중 최대 제약은 여수로 또는 하도 통수능력을 나타내는데, 월단위 조작에서는 비활성적이므로 본 연구에서는 반영하지 않았다. 식 (5)는 저수지로부터 취수하는 수량에 대한 제약조건식으로서 수요량 이상은 공급할 필요가 없음을 나타낸다.

$$S(j+1) - S(j) + R(j) + RR(j) + L(j) = F_j^{-1}(\alpha) \quad (2)$$

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

$$R_{\min}(j) \leq R(j) \leq R_{\max} \quad (4)$$

$$RR \leq DR \quad (5)$$

$$\beta \leq \alpha \leq 1.0 \quad (6)$$

여기서,

- S : 저수지 저류용량
- $S_{\max}$  : 저수지 최대저류용량
- $S_{\min}$  : 저수지 최소저류용량
- $R_{\max}$  : 저수지 최대방류량
- $R_{\min}$  : 저수지 하류 책임방류량
- RR : 저수지의 직접취수량
- L : 중발 등의 저수지 손실량
- DR : 용수 수요량
- $\alpha$  : 유입량의 신뢰도
- $\beta$  : 함수의 오목성을 유지하는 신뢰도 구간의 下限值

그리고 식 (6)에서 신뢰도는 이론적으로는 0.0~1.0 범위 내의 값이지만 함수  $F^{-1}(\alpha)$ 의 아래쪽 오목성

(concavity)을 보장하도록 下限值를 설정하였다. 이 때 반대수지에서  $F^{-1}(\alpha)$ 는 일반적으로 그림 3에서 볼 수 있는 것처럼 오목곡선과 볼록곡선이 혼합되어 나타나므로, 이 함수의 아래쪽 오목성을 보장하는 구간의 제한이 필요한데 그림 3과 같이 정규확률 분포함수는 반대수지에서 누가 확률 0.5에서 변곡점을 가지므로 본 연구에서는 0.5를 적용하였다. 신뢰도 0.5인 확률 유입량은 일정한 유의 수준에서 유입량 대수치의 평균값으로 볼 수 있으므로 이 값은 홍수시 높은 방수위로 인한 발전량 감소 현상을 감안할 때 평균발전량에 가까운 실제적인 의미를 갖는다.

## 2.3 손실함수

식 (1)에서 손실함수  $l(\alpha)$ 은 저수지 유입량이 주어진 신뢰도 유량보다 적을 경우의 손실에 대한 벌칙금이다. Colorni 등<sup>(6)</sup>의 접근법과 같이 손실함수는 신뢰도 증가에 따라 지수적으로 감소한다고 가정하여, 손실함수는 신뢰도  $\alpha$ 를 변수로 하는 對數式으로 나타내면 식 (7) 및 그림 1과 같다. 이때 손실함수를 포함하도록 설계된 목적함수를 최대화할 경우, q 값에 대한  $\alpha$ 의 민감도를 분석하여 의미 있는 q 값을 선택해야 한다. q 값은 수입, 즉 전력금액의 판매가격을 단위금액으로 했을 때의 상대적인 가치치를 뜻하는 값으로 이후 손실계수라 칭하였다.

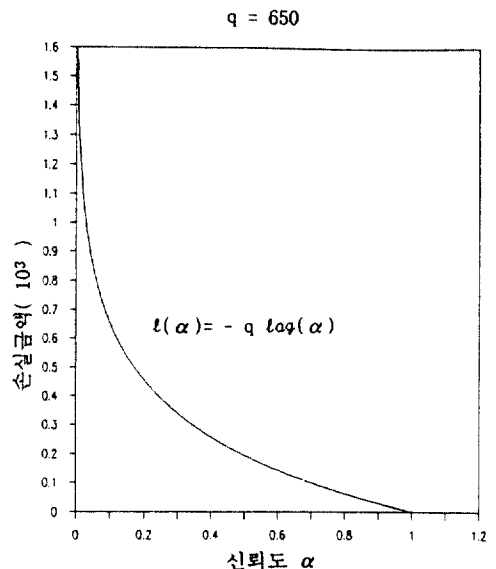


그림 1. 손실 함수

$$l(\alpha) = -q \log(\alpha) \quad (7)$$

기법<sup>(8)</sup>에 의하여 풀었다.

### 2.4 유입량에 대한 신뢰도

유입량 신뢰도(reliability)는 용수 또는 전력량의 공급 측면에서 최소한 보장할 수 있는 확률을 뜻한다. 다시 말하면 유입량에 대한 신뢰도는 유입량의 확률밀도함수에서 그 유입량의 超過確率을 의미한다.

이 연구에서는 월별 유입량의 확률밀도함수를 검정, 채택하여 신뢰도별, 월별 유입량을 산정하였고 이로부터 전기에너지를 산출하였다.

## 3. 모형의 해법

신뢰도별로 유입량이 산정되면 식 (2)~(6)의 제약조건에 따라 식 (1)을 풀어야 한다. 식 (1)은 매우 복잡한 비선형 함수이므로 식 (6)과 같이 해의 영역을 제한하여 unimodal 함수로 단순화하였다. 식 (1)의 해법은 크게 2 단계로 나누어지는데, 첫 단계에서는 주어진 신뢰도  $\alpha$ 의 유입량에 대한 저수지 최적운영 알고리즘이 마련되어야 하고, 두번째 단계에서는 목적함수를 최대화시키는 최적 신뢰도를 구해야 한다. 이 연구에서는 증분 동적계획 기법(IDP)과 1 차원 조사기법을 각각 단계별로 적용하였다.

### 3.1 증분 동적계획 기법

다단계 시스템의 최적화는 Bellman의 最適性의 原理<sup>(7)</sup>에 따라 역차 반복함수식(recursive equation)으로 나타낼 수 있다.

$$FR_n = \text{Max}_{R_n} [ \{ C_{1,n} \cdot E_1(S_n, R_n, n) + C_{2,n} \cdot E_2(S_n, R_n, n) \} - l(\alpha) ] \quad (8a)$$

$$FR_{n-1} = \text{Max}_{R_{n-1}} [ \{ C_{1,n-1} \cdot E_1(S_{n-1}, R_{n-1}, n-1) + C_{2,n-1} \cdot E_2(S_{n-1}, R_{n-1}, n-1) - l(\alpha) \} + FR_n ] \quad (8b)$$

여기서,

$FR_n$  :  $R_n$ 에 따른 마지막 n 구간의 최대 순편익  
 $FR_{n-1}$  :  $R_{n-1}$ 에 따른 (n-1)과 n 구간의 최대 순편익

전력수입함수는 分離性(seperability)을 가지므로 본 연구에서는 식 (8)을 順次的으로 증분 동적계획

### 3.2 黃金比 조사 기법

신뢰도  $\alpha$ 일 때 순편익 함수를  $FR(\alpha)$ 로 나타내면,  $FR(\alpha)$ 는 Colorni 등<sup>(6)</sup>이 증명한 바와 같이 제한된 일정한 영역인  $D^* = \{ \alpha : \alpha^* \leq \alpha \leq 1 \}$ 에서 아래로 오목하다. 여기서  $\alpha^*$ 는 그림 3과 같이  $F^1(\alpha)$ 의 변곡점이다. 그런데 신뢰도( $\alpha$ ) 조사구간을 더욱 축소하여  $D^* = \{ \alpha : \beta \leq \alpha \leq 1, \beta \leq \alpha^* \}$ 로 하면 不確實 區間長(interval of uncertainty)을 짧게 하므로 계산상 유리하다. 그러나 본 연구에서는  $\beta$ 값을  $\alpha^*$ 값인 0.5로 취하였다. 따라서 최적화 모형의 제 2 단계는 식 (9), (10)과 같이 나타낼 수 있으며 식 (9)는 연속이고 unimodal 함수이다.

$$\text{Max}_{\alpha} FR(\alpha) \quad (9)$$

$$\text{s.t. } \alpha \in D^* \quad (10)$$

여기서,  $FR(\alpha)$  : 신뢰도  $\alpha$ 일 때 순편익

본 연구에서는 순편익을 최대로 하는 신뢰도  $\alpha$ 를 구한 위의 제 2 단계 모형을 풀기 위해서 황금비 조사기법을 이용하였다. 이 때 수렴조건은 미리 설정한 신뢰도의 불확실 구간 길이  $\epsilon$ 이다.

### 3.3 연산법의 결함

황금비 조사 기법에 의하여 각 조사점마다  $FR(\alpha^{(1)})$ ,  $FR(\alpha^{(2)})$ , ...을 구하여  $D^*$  영역에서 최적해  $\alpha^{(d)}$ 를 결정할 수 있다. 이때  $\alpha = \alpha^{(d)}$ 에 대한  $FR(\alpha^{(d)})$ 은 저수지 조작에 의한 목적함수 식 (1)의 최적 값이 된다. 여기서  $FR(\cdot)$ 을 구하기 위한 저수지 최적조작은 증분 동적계획 기법에 의하여였다.

### 3.4 연산 과정

연산 과정은 그림 2의 흐름도와 같다. 여기서 상 태증분 동적계획에 의한 저수지의 최적조작은 충남 대학교 수자원 연구실에서 개발한 프로그램에 조작 기간의 초기 및 종기 저류량을 만수위인 경계조건을 충족시키도록 조작기간을 9 월 초부터 그 다음 해 8 월 말까지로 하여 저류수준이 일치되도록 수정하여 적용하였고, 최적의 신뢰도를 결정하기 위한 황금비 조사기법은 상용 팩키지<sup>(9)</sup>를 수정하여 사용하였다.

표 1. 확률분포의 월별 매개변수

단위 : MCM

월	평균	표준편차	월	평균	표준편차
1	79.47	62.01	7	716.79	403.72
2	105.51	83.99	8	618.61	413.92
3	152.86	89.92	9	373.58	302.76
4	231.71	159.06	10	124.61	81.18
5	187.22	120.64	11	99.90	62.61
6	235.81	191.20	12	89.39	45.17

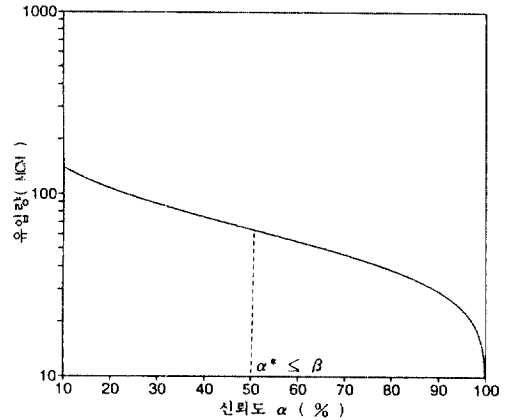


그림 3. 신뢰도별 유입량(1월)

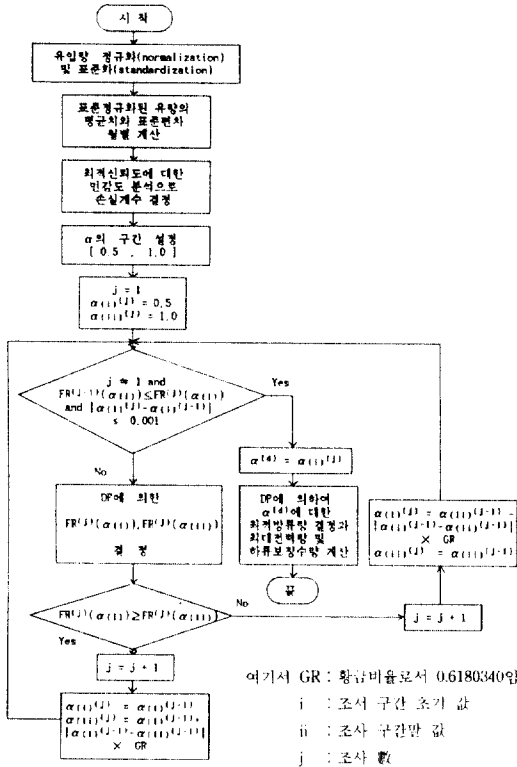


그림 2. 계산 흐름도

여기서 GR: 황남비율로서 0.6180340임  
 i : 조사 구간 초기 값  
 ii : 조사 구간말 값  
 j : 조사 수

#### 4. 적용 및 결과 고찰

대청 다목적댐 수력발전소에 본 모형을 적용하여 다음의 결과를 얻었다.

##### 4.1 유량자료 특성 및 경계 조건과 증발손실

본 연구에서는 대청댐의 20년간(1969~1988) 월별 유입량에 대한 확률밀도 함수는 2 변수 대수정규 분포로 가설하여  $\chi$  square test로 검정하여 유의수준 5%에서 채택되었다. 이 때 이 분포의 월별 매개변수는 표 1과 같고 유입량의 초과확률함수는 그림 3과 같다.

저수지 조작(operation)은 월단위 12단계로 수행 하였으며, 경계조건은 대청댐의 운영실적에 맞도록 실적치를 조사하여 貯水池 滿水 시기인 9월을 제 1월, 이듬해 8월을 제 12월로 하고, 제 1월과 제 13월 초(제 12월 말)의 저수지 수위는 상시만수위(EL. 76. 5 m)로 하였다.

저수지의 증발 손실량은 대전, 청주의 평균 접시 증발고의 0.7 배를 저수면적에 곱하여 구하였다.

##### 4.2 목적함수 및 손실계수(q) 결정

목적함수에서 수입은 하루발전 기준시간을 5시간으로 하여 1차 및 2차 에너지로 구분하여, 1차 에너지의 판매가는 단위금액으로 하고, 2차 에너지는 1차 에너지 가의 70%로 하였다. 전력 가치는 계절별 부하 특성에 따라 다른데, 우리나라는 이에 관한 분석 자료가 없으므로 여기서는 편의상 표 2와 같이 가정하여 계절별로 평가하였다.

그림 4와 같이 식 (7)에서 손실계수 q가 너무 크면 신뢰도를 벗어나는 위험도에 따른 손실량이 너무 커서 순편익은 상대적으로 미소하게 되어 전력 판매수입이 목적함수에서 과소평가되며, q 값이 너무 작으면 수입에 비해 상대적으로 손실량이 미소하게 되어 손실함수의 도입이 무의미해진다. 따라서 신

표 2. 월별 수입계수

월	1	2	3	4	5	6
C <sub>1</sub>	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	2.0
C <sub>2</sub>	1.4	1.4	0.7	0.7	0.7	1.4

월	7	8	9	10	11	12
C <sub>1</sub>	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	2.0
C <sub>2</sub>	1.4	1.4	0.7	0.7	0.7	1.4

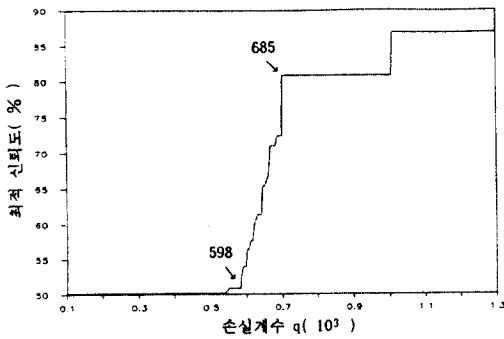


그림 4. 손실계수 q에 따른 최적 신뢰도

되도에 따른 수입과 손실이 서로 점차적으로 타협되는 영역에서 q 값을 선정해야 하는데 대청댐 수력발전소의 경우에 q 값의 범위는 그림 4에서 보는 바와 같이 신뢰도에 민감하게 영향을 주는 구간이 598~685로 판단되므로 650을 채택, 적용하였다.

수렴조건은 신뢰도  $\alpha^{(d)}$ 의 精度  $\epsilon$ 을 0.001로 하여, 신뢰도의 최적값은 구간  $[\alpha^{(d)} \pm 0.0005]$  안에서 결정토록 하였다.

### 4.3 목적함수 및 오목성

황금비 조사기법으로 최적의 신뢰도  $\alpha^{(d)}$ 를 찾기 위해서는 목적함수가 unimodal 함수이어야 하는데 대청호의 경우 그림 5와 같이 목적함수는 오목성을 갖는다.

### 4.4 최적 전력판매 계약량

본 연구에서는 유입량 자료를 확률처리하여 조작기간 12개월에 대하여 저수지 조작을 수행하였다. 따라서 본 연구에 따른 저수지 운영 및 수력에너지를

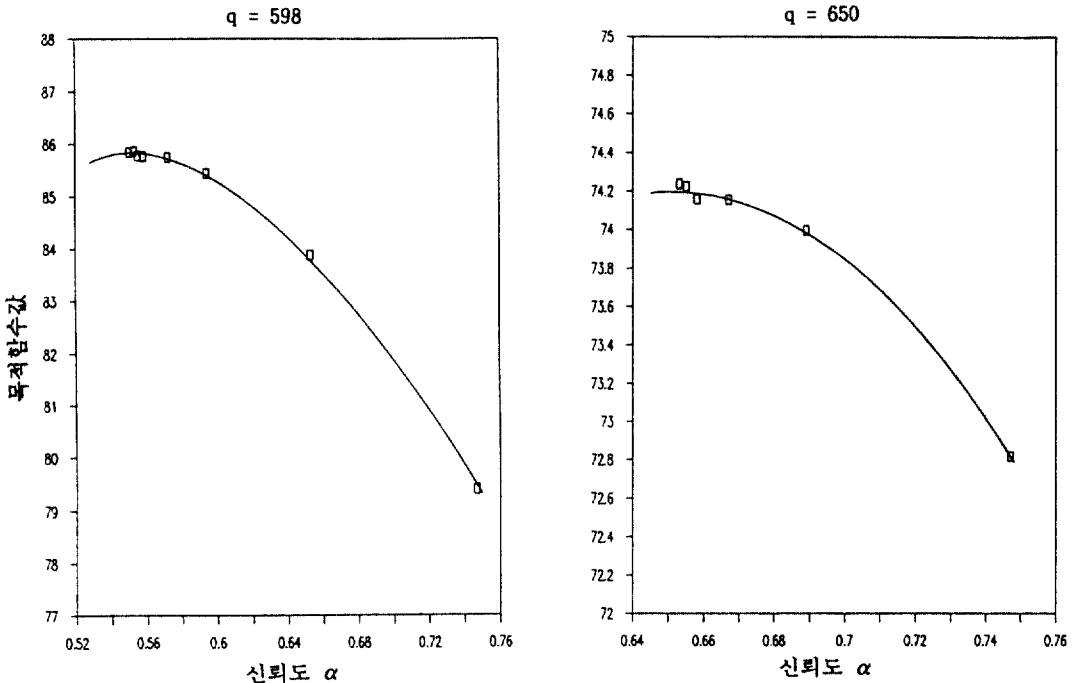


그림 5. 목적함수의 오목성

생산량을 운영실적 및 기존 연구와 비교하기 위하여, 유입량 대수치의 평균값에 해당하는 50% 신뢰도일 때의 성과와 비교하면 표 3과 같다. 여기서 기존 연구는 용수공급 최대화를 목적함수로 D.P.에 의한 결과이다. 10년간의 발전 실적치는 본 연구 발전량의 99%로서 매우 비슷한 결과를 보인다. 다시 말하면 대청 발전소의 전력공급 신뢰도는 50% 수준이라고 볼 수 있다.

일반적으로 최적화성과는 추계학적 모형에 의한 경우에도 실적치보다 크게 평가된다. 그러나 대청댐 실적치는 최소보장유량과 용수공급량에 대한 기준이 본 연구와 다르기 때문에 그 값이 근접되었다고 판단된다. 여기서 본 연구의 용수수요량은 장래(2001년 기준) 용수공급량으로서 실적 기간(1981~1988)의 평균 용수 실적<sup>(10)</sup>보다 약 4.7 배인  $410.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ 이다.

표 3. 전력량 대비

구 분	기 간	연간 발전량( $10^6 \text{ KWH}$ )			대비	비고
		1차	2차	계		
발전 실적 <sup>(11)</sup>	81-90	--	--	237.5	0.99	
기존 연구 <sup>(10)</sup>	69-88	120.4	128.3	248.7	1.04	D.P.
본 연구	-	103.2	136.1	239.3	1.00	D.P.

표 4. 최적 전력 계약량

신뢰도 (%)	목적 함수			연간 에너지( $10^6 \text{ KWH}$ )			비 고
	수 입	손 실	순편익	1 차	2 차	계	
74.7	115.159	82.342	72.817	71.086	47.299	118.386	q = 650
65.3	194.544	120.306	74.238	81.778	76.068	157.846	
68.9	179.153	105.158	73.995	77.464	65.103	142.567	최소하류방류량
65.3	194.544	120.306	74.238	81.778	76.068	157.846	= $14.5 \text{ m}^3/\text{s}$
66.7	188.472	114.318	74.154	79.937	72.106	152.043	
65.3	194.544	120.306	74.238	81.778	76.068	157.846	2001년 용수
65.8	192.309	118.153	74.156	81.043	74.531	155.574	수요 기준
65.3	194.544	120.306	74.238	81.778	76.068	157.846	= $410.5 \times$
65.5	193.667	119.443	74.224	81.506	75.485	156.990	$10^6 \text{ m}^3/\text{年}$
65.3	194.544	120.306	74.238	81.778	76.068	157.846	
<b>65.4</b>	<b>194.134</b>	<b>119.874</b>	<b>74.260</b>	<b>81.668</b>	<b>75.853</b>	<b>157.541</b>	

표 5. 최소 하류방류량에 따른 민감도 분석

最小流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	최적 신뢰도 (%)	목적함수(原單位)			에너지( $10^6 \text{ KWH}$ )			하류보장 水量 ( $\text{MCM}/\text{年}$ )
		수 입	손 실	순편익	1차	2 차	계	
9.0	67.2	187.872	112.210	75.662	78.835	72.729	151.564	283.824
12.0	65.5	194.401	119.874	74.958	81.323	76.449	157.771	378.432
<b>14.5</b>	<b>65.4</b>	<b>194.134</b>	<b>119.874</b>	<b>74.260</b>	<b>81.688</b>	<b>75.853</b>	<b>157.541</b>	<b>457.272</b>
16.0	67.2	186.242	112.210	74.032	80.109	69.159	149.268	504.576

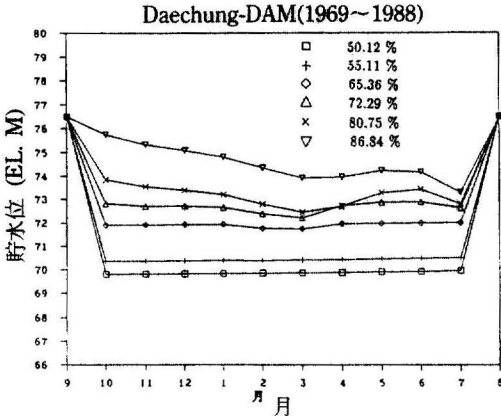


그림 6. 신뢰도별 貯水位 자취(순편의 최대화)

그리고 기존 연구의 발전량<sup>(10)</sup>은 본 연구 성과의 1.04 배로서, 이는 기존 연구의 평균기준이 본 연구와 다르고, 기존 연구는 확정론적인 유입량을 썼기 때문이라고 할 수 있다. 따라서 표 3은 엄격한 수치 비교가 아니며, 대체적인 판단의 목적으로 작성된 것이다.

대청댐 수력발전소의 최적 판매계약 전력량은 손실계수를 650으로 하고 최소 방류량을 14.5 m<sup>3</sup>/s로 할 때, 표 4에서 보는 바와 같이 신뢰도 65.4%인 157.541×10<sup>6</sup> KWH/年이다.

#### 4.5 신뢰도별 貯水位 자취분석

신뢰도별 목적함수 값이 최대일 때 저수지 자취를 분석하면, 그림 6과 같이 유입량이 많은 경우 즉 신뢰도가 낮은 유량계열일 때는 발전사용수량이 크고, 반면에 유량이 적은 갈수년에는 사용수량을 줄이고 낙차를 크게 해야 함을 보여 주고 있다.

#### 4.6 최소 하류방류량에 따른 민감도 분석

최소 방류량을 증가시키면 표 5에서 목적함수 값 즉 순편익은 예기되는 대로 점차 감소한다. 그러나 에너지는 비선형함수로서 방류조건에 따라 단조 증가 또는 감소하지 않는다.

### 5. 결론 및 토의

대청 수력발전소의 전력 판매 계약량을 합리적으로 결정하기 위하여, 저수지 유입량의 신뢰도에

따른 전력수입과 신뢰도를 벗어날 때의 벌칙금 사이의 최적조합을 구하였으며, 그 주요 결론은 다음과 같다.

1) 초과확률 0.5~1.0 내에서 본 모형의 목적함수는 오목함수였으므로 1 차원 조사기법의 적용이 가능했다.

2) 손실함수는 최적의 신뢰도와 손실계수(q)의 민감도 분석으로부터 정해지는데, 대청댐의 경우에는 전력량 판매요금을 단위금액으로 할 때 q 값은 대략 600~680의 범위내에서 결정된다.

3) q 값을 650하고 하류 책임방류량을 14.5 m<sup>3</sup>/s로 할 경우, 대청댐의 최적신뢰도는 65.4%이고 이때 연간 電力量은 157.54×10<sup>6</sup>KWH이다.

4) 최소 하류 책임방류량을 증가시키면 최적 신뢰도 및 발전량 등은 단조롭게 변화되지 않으나 순편익은 감소된다.

5) 최적 저수지조작의 자취를 검토한 결과, 유입량이 작을수록 사용수량을 억제하고 수위를 높게 유지해야 함을 보여 주는데, 이는 현재 저수지 운영 실태에 문제점을 제기해 준다.

본 연구에서 제기되는 문제와 적용의 제한성은 다음과 같다.

1) 서론에서 기술한 바와 같이 유입량의 신뢰도는 전력 생산량의 신뢰도와 반드시 일치하지는 않는다. 추계학적 유입량을 써서 발전량 자체의 신뢰도를 구하려면 월별 상태 변수의 전이확률이 고려되어야 할 것이다.

2) 본 연구에서는 연간 균일 신뢰도를 썼으나, 수력에너지의 월별 가치 변동을 고려하여 월별로 신뢰도를 달리 적용하여 최적 계약량을 결정할 수도 있다.

3) 이 연구에서 도출된 최적 신뢰도는 손실계수 값에 따라 달라질 수 있으며, 더구나 이 신뢰도는 다른 수력 발전소에 대한 판단 기준이 될 수 없다.

### 참 고 문 헌

1. Lee, Han-Lin and E. D. Brill, *Reliability of Reservoir Operation under Hydrologic Uncertainty*, Water Resources Center, University of Illinois at Urbana Champaign, Research Report, No. 207, July



- 1987.
2. Askew, A. J., "Optimum Reservoir Operating Policies and the Imposition of a Reliability Constraint," *W. R. R.*, Vol. 10, No. 1, pp. 51-56, February 1974.
  3. Askew, A. J., "Chance-Constrained Dynamic Programming and the Optimization of Water Resource Systems," *W. R. R.*, Vol. 10, No. 6, pp. 1099-1106, December 1974.
  4. Askew, A. J., "Use of Risk Premium in Chance-Constrained Dynamic Programming," *W. R. R.*, Vol. 11, No. 6, pp. 862-866, December 1975.
  5. ReVelle, C., E. Joeres, and W. Kirby, "The Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design, 1. Development of the Stochastic Model," *W. R. R.*, Vol. 5, No. 4, pp. 767-777, August 1969.
  6. Colorni, A., and G. Fronza, "Reservoir Management via Reliability Programming," *W. R. R.*, Vol. 12, No. 1, pp. 85-88, 1976.
  7. Bellman, R. E., and S. E. Dreyfus, *Applied Dynamic Programming*, Princeton Univ. Press, Princeton, N.J., 1962.
  8. Larson, R. E., *State Increment Dynamic Programming*, American Elsevier Publishing Co., N.Y., 1968.
  9. Press, W. H. et al., *Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, pp.277 - 282, 1986.
  10. 한국수자원공사, **용담다목적댐 타당성 조사 보고서**, pp. 11-3~11-35, 1990. 8.
  11. 한국전력공사, 수력발전부, **수력발전소 운용자료집 (1971-1990 실적)**, pp. 38-39.  
(接受 : 1992. 10. 28)