

자유경쟁 시장에서 수력 발전소의 최적 공급 전력량 결정

○유 주 환 *

1. 서론

1.1 연구목적

현재까지 우리나라의 수력 발전소는 전력 생산량을 국영 기업체인 공사에 판매하고 있으며, 공사는 생산 실적에 따라 계약된 일정한 요금을 생산자에게 지불하고 있다. 그러나 이러한 매매 계약에는 전력 생산에 포함된 유입량의 추계학적 특성을 고려하지 않았지만 전력 시장이 자유화 되면 유입량의 확실적인 신뢰도를 바탕으로 하여 합리적인 전력 생산량의 평가가 필요하다. 즉 장래 전력 시장이 다자간 수요와 공급체계가 되면 전력 에너지 가격은 전력 부하의 계절적 변동과 전력 특성에 따라 차등적으로 적용될 것이고, 한편으로 전력생산자가 계약한 전력량을 공급하지 못하는 경우에는 적절한 벌칙금이 부과되어야 할 것이다.

이에 본 연구에서는 시장 경계의 원리가 적용되는 전력 수급 체제에서 수력 발전소 전력 생산자의 입장에서 추계학적인 특성을 갖는 유입량에 대하여 신뢰도를 벗어날 경우 벌칙(penalty)을 감안한 최적 공급량을 결정하고 이때 최적 신뢰도를 구하였다. 여기서 저수지 조작기법은 동적계획 기법을 이용하였고 최적 신뢰도는 황금비 조사기법에 의하여 결정된다.

1.2 연구동향 및 범위

본 연구에는 추계학적인 저수지 조작 모형이 요구된다. 추계학적 모형의 의의는 수문학적인 불확실성 속에서 시간적, 공간적 또는 시간-공간적으로 상관성을 갖는 유하량의 추계학적 성질을 수학적 모형에 결부시키는데 있다.⁽¹⁾ 위험도(risk) 또는 신뢰도(reliability)를 고려하지 않는 추계학적 저수지 조작 모형은 예측치 못할 높은 확률로 신뢰도를 벗어나 실패(failure)할 수 있다.⁽¹⁾ Askew^{(2),(3),(4)}는 저수지 조작에 위험도 및 신뢰도를 고려하기 위해서 페널티 함수 접근법을 제안했는데 이 때 페널티를 변화시키며 저수지 시스템이 실패하는 확률을 조사하였다. Revelle 등⁽⁵⁾은 위험도를 포함하는 신뢰도 모형으로 선형 결정룰(linear decision rule)을 개발하여 저수지를 계획하는 방법을 제안하였다. 용수 공급 계약량을 공급하지 못하는 경우의 손실을 순편익과 조합한 확률제약 모형은 Colomi 등⁽⁶⁾이 제안했는데 이와 같은 확률제약 프로그램에서는 매개변수로 취급한 신뢰도에 대한 편익계수 및 손실함수의 민감도 분석이 중요하다.

한편 수력에너지의 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 유입량만을 확률변수로 보았다.

* 영동대학교 건설공학부 토목공학과 전임강사 (jhyoo@youndong.ac.kr)

2. 모형 설계

2.1 목적함수

본 연구에서는 신뢰도별 유입량에 대한 발전수입과 신뢰도를 벗어난 경우 손실함수(벌칙금)와의 차를 1 차적으로 최대화하도록 월별 방류량을 결정하여 발전량을 계산하고, 2 차적으로 이 순편익이 최대화되는 신뢰도 값을 결정할 수 있도록 식 (1)과 같이 목적함수를 설정하였다.

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

여기서, $E_1(j)$: j 단계 동안의 1차 수력 에너지(KWH)

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

η : 합성효율로서 발전기 및 수차효율의 곱임(상수로 취급함).

w : 물의 단위중량(9.81 KN/m³)

$R(j)$: 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 수입을 나타내는 계수

C_3 : j 단계 유입량(MCM)의 유량(m³/s) 단위 환산 계수

$I(\alpha)$: 신뢰도 α 에 따른 손실함수

J : 시간축의 총 길이 단위 수

j : 저수지 조작 시간 축의 위치

α : 유입량에 대한 신뢰도[0, 1]

2.2 제약 조건

목적함수의 제약조건식 (2)의 좌변항은 저류방정식을 구성하는 유입량 I_j 이고 이 때 $F_j(I)$ 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 $I_j = F^{-1}(\alpha)$ 이다. 그러므로 단위 기간별 유입량을 주어진 신뢰도의 추계학적 유량으로 나타내면 식 (2)와 같다.

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

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

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

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

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

여기서, S : 저수지 저류용량

S_{\max} : 저수지 최대 저류용량(NHWL)

- S_{min} : 저수지 최소 저류용량(LWL)
- R_{max} : 저수지 최대방류량(여수로 또는 하도통수능, Inactive)
- R_{min} : 저수지 하류 책임방류량
- RR : 저수지의 직접취수량
- L : 증발 등의 저수지 손실량
- DR : 용수 수요량
- α : 기간 j 동안 유입량의 신뢰도
- β : 함수의 오목성을 유지하는 신뢰도 구간의 하한치(0.5적용)

2.3 손실함수

식 (1)에서 손실함수 $l(\alpha)$ 는 저수지 유입량이 주어진 신뢰도 α 의 유량보다 적을 경우의 손실에 대한 벌칙금이다. Colomi 등⁽⁶⁾의 접근법과 같이 손실함수는 신뢰도 증가에 따라 지수적으로 감소한다고 가정하여, 손실함수는 신뢰도 α 를 변수로 하는 대수식으로 나타내면 식 (7) 및 그림 1과 같다.

$$l(\alpha) = -q \log(\alpha) \tag{7}$$

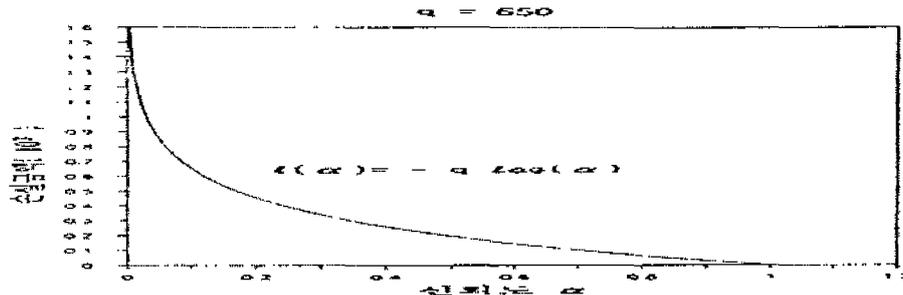


그림 1. 손실 함수

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 초과확률을 의미한다.

3. 모형의 해법

본 연구에서는 저수지 조작기법으로 증분 동적계획기법(IDP)과 1차원 조사기법으로 황금비 조사기법을 각각 단계별로 적용한다.

3.1 증분 동적계획 기법

다단계 시스템의 최적화는 Bellman의 최적성의 원리⁽⁷⁾에 따라 역차 반복함수식(recursive

equation)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 FN_n &= \text{Max}_{R_n} [\{ C_{1,n} \cdot E_1(S_n, R_n, n) + C_{2,n} \cdot E_2(S_n, R_n, n) \} - I(\alpha)] \\
 FN_{n-1} &= \text{Max}_{R_{n-1}} [\{ C_{1,n-1} \cdot E_1(S_{n-1}, R_{n-1}, n-1) + C_{2,n-1} \cdot E_2(S_{n-1}, R_{n-1}, n-1) \\
 &\quad - I(\alpha) \} + FN_n]
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

여기서, FN_n : R_n 에 따른 마지막 n 구간의 최대 순편익
 FN_{n-1} : R_{n-1} 에 따른 $n-1$ 과 n 구간의 최대 순편익

3.2 黄金比 조사 기법

신뢰도 α 일 때 순편익 함수를 $FN(\alpha)$ 로 나타내면, $FN(\alpha)$ 는 Colomi 등⁽⁶⁾이 증명한 바와 같이 제한된 일정한 영역인 $D^* = \{ \alpha : \alpha^* \leq \alpha \leq 1 \}$ 에서 아래로 오목하다.

$$\text{Max}_{\alpha} FN(\alpha) \tag{9}$$

$$\text{s.t. } \alpha \in D^* \tag{10}$$

3.3 연산 과정

연산 과정은 그림 2의 흐름도와 같다. 여기서 상태증분 동적계획은 충남대 수공학 연구실에서 개발한 프로그램(권오현, CNUDP)을 이용하고 황금비 조사기법은 상용 패키지⁽⁹⁾를 수정하여 사용하였다.

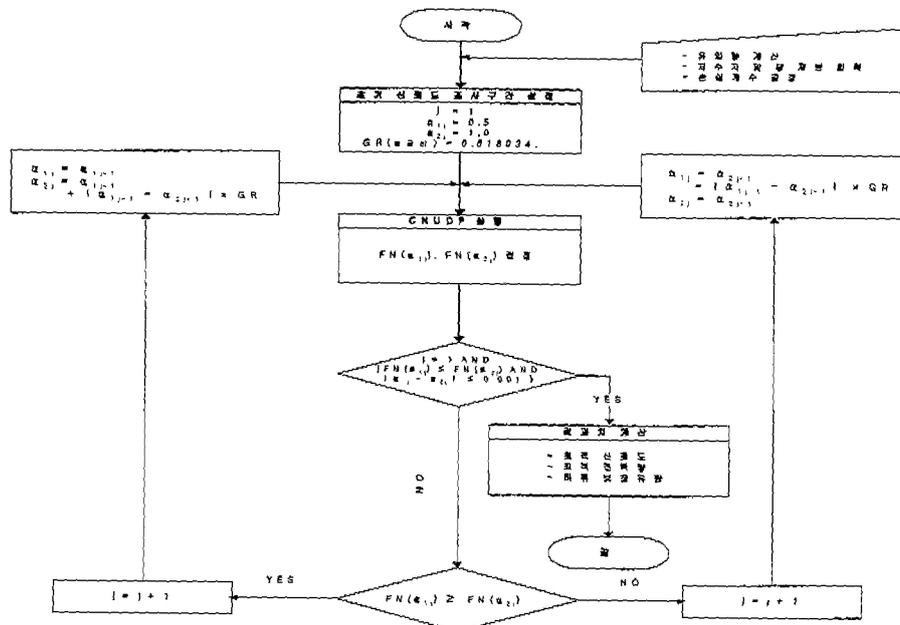


그림 2. 계산 흐름도

4. 적용 및 기대효과

4.1 예비 적용결과

20 년간(1969~1988) 월별 유입량을 이용하여 대청 다목적댐 수력발전소에 적용한 결과를 요약하면 표 1, 표 2, 그림 3과 같다.⁽¹²⁾

표 1. 전력 생산량 비교

구 분	기 간	연간 발전량 (10 ⁶ KWH)			대 비	비 고
		1차	2차	계		
발전 실적 ⁽¹³⁾	81-90	-	-	237.5	0.99	
기존 연구 ⁽¹²⁾	69-88	120.4	128.3	248.7	1.04	DP
본 연구	-	103.2	136.1	239.3	1.00	DP

표 2. 최적치 결정

最小流量 (m ³ /s)	최 적 신뢰도 (%)	목 적 합 수(原單位)			에너지 (10 ⁶ KWH)			하류보장 水 量 (MCM)
		수 입	손 실	순편익	1차	2차	계	
9.0	67.2	187.872	112.210	75.662	78.835	72.729	151.564	238.824
12.0	65.5	194.401	119.874	74.958	81.323	76.449	157.771	378.432
14.5	65.4	194.134	119.874	74.260	81.688	75.853	157.541	457.272
16.0	67.2	186.242	112.210	74.032	80.109	69.159	149.268	504.576

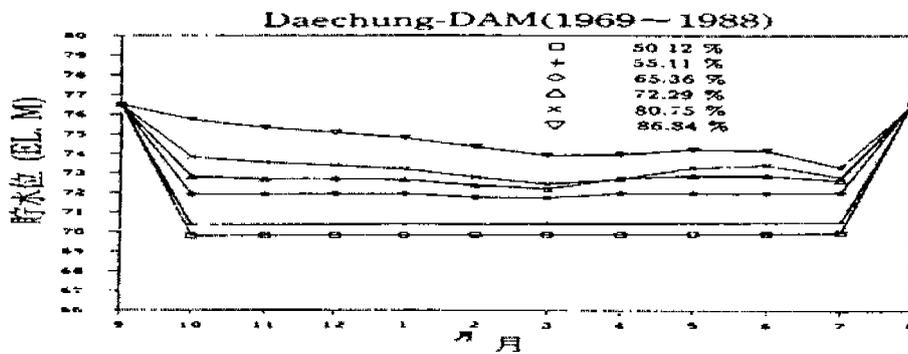


그림 3. 신뢰도별 저수위 자취

4.2 기대효과

본 연구에서는 예비연구(preliminary study)를 바탕으로 금강수계 다목적댐에 적용할 계획으로 다음과 같은 기대효과를 얻을 수 있다.

- ☞ 용담다목적댐과 대청다목적댐의 최적 연계운전을 통해 이수적능력을 극대화할 수 있음.
- ☞ 용담댐-대청댐 발전 시스템의 최적 수력발전량과 수문학적 신뢰도를 평가할 수 있음.

- ☞ 시장경쟁체제에서 수력발전량과 신뢰도를 제시함으로써 합리적 전력 가격 결정에 기초를 제공함.
- ☞ 용담댐과 대청댐의 최적 저수지 조작 특성으로 유입량의 신뢰도에 따른 저수위 자취(Rule Curve)를 파악함으로써 저수지 관리의 가이드 라인을 제공할 수 있음.
- ☞ 본 연구성과는 한강유역, 낙동강유역, 영산강 및 섬진강유역 등 타 유역의 다목적 댐과 발전전용 댐의 수력발전 생산량 평가에도 적용 가능할 것임.

5. 참고문헌

- (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," Water Resources Research, Vol.10, No.1, pp.51-56, February 1974.
- (3) Askew, A. J., "Chance-Constrained Dynamic Programming and the Optimization of Water Resource Systems," Water Resources Research, Vol.10, No.6, pp.1099-1106, December 1974.
- (4) Askew, A. J., "Use of Risk Premium in Chance-Constrained Dynamic Programming," Water Resources Research, 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," Water Resources Research, Vol.5, No.4, pp.767-777, August 1969.
- (6) Colorni, A., and G. Fronza, "Reservoir Management via Reliability Programming", Water Resources Research, 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) 권오현, 저수지군의 다단계 최적 입안에 관한 연구, 건국대학교 대학원, 석사학위논문, 1976.
- (11) 유주환, 저수지 유입량의 신뢰도를 고려한 최적계약 전력량의 결정, 충남대학교 대학원 석사학위논문, 1992.2.
- (12) 한국수자원공사, 용담다목적댐 타당성 조사 보고서, pp.11-3~11-35, 1990. 8.
- (13) 한국전력공사, 수력발전부, 수력발전소 운용자료집(1971-1990 실적), pp.38-39.