

**창립**  
40주년학술대회  
논문 87-C-20-3

주간 단위로한 확률론적 연간 최적 저수지  
경제 운용에 관한 연구

송길영                      김영태                      한병률  
고려대학교                고려대학교                고려대학교

A Study on Optimal Economic Operation of Hydro-reservoir  
System by Stochastic Dynamic Programming with Weekly Interval.

Gil-Yeong Song                      Yeong-Tae Kim                      Byeong-Yul Han  
Korea University                      Korea University                      Korea University

Abstract- Until now, inflow has been handled an independent log-normal random variable in the problem of planning the long-term operation of a multi-reservoir hydro-thermal electric power generation system.

This paper introduces the detail study for making rule curve by applying weekly time interval for handling inflows. The hydro system model consists of a set of reservoirs and ponds. Thermal units are modeled by one equivalent thermal unit. Objective is minimizing the total cost that the summation of the fuel cost of equivalent thermal unit at each time interval. For optimization, stochastic dynamic programming (SDP) algorithm using successive approximations is used.

1. 서론

수확력    비용    계통에서    경제    운용이란    대상  
기간내에서    주어진    부하와    예측된    유입량에    대해서    총  
확률    발전    비용을    최소화    하는    각    수력    발전소의  
사용    수량을    결정하는    것이다.    저수지    경제    운용의  
지침으로써    부하와    유입량을    결정론적으로    취급하여  
경제    운용의    조건을    만족하는    결정론적인    저수지    기준  
수위    곡선 (Rule curve) 을    작성하는    방법이  
오래    전    부터    사용되어    왔으나    점차로    부하와  
유입량을    확률론적으로    취급하는    것이    세계적인  
추세이다.

본    연구는    주    단위로    연간    저수지    경제    운용  
계획을    수립함으로써    월    단위    연간    저수지    기준    수위  
곡선    작성시    유입량의    실적이    예측치의    범위를  
벗어남으로써    인해    발생할    수    있는    기준    수위    곡선과  
실제    저수지    운용    곡선과의    차이를    줄이므로써    보다  
현실적인    출수    예측을    가능케    하였으며,    이외    최적화  
수법으로는    확률론적인    D. P. S. A. (Dynamic  
Programming    Successive    Approximation)    을    사용하였다.

2. 계통의 모델화

수력    계통은    다수개의    저수지와    다수개의    조정지로  
구성된    것으로    보았고    확률계통은    1기    등가    확률기로  
모델링    하였으며    송전    계통은    무시하였다.

(1) 저수지 모델

저수지    모델은    다음과    같은    저수지    방정식으로  
나타난다.

$$\frac{dS(t)}{dt} = J(t) - Q(t) \quad (2.1)$$

$t \in [0, T]$   
 $T$ : 고갈 기간

고갈    기간을    시구간     $t$     를    갖는     $NT$     시간대로  
이산화    할    경우    식    (2.1)    은    식  
(2.2),    식    (2.3)    과    같이    나타낼    수    있다.

$$\frac{S(t+\Delta t) - S(t)}{\Delta t} = J(t) - Q(t) \quad (2.2)$$

$$S(i+1) = S(i) + J(i) - Q(i) \quad (2.3)$$

$i$ : [1, NT]  
 $\Delta t = T/NT$  [a]  
 $S(i)$ :  $i$  시간대 초의 저수량  
 $J(i)$ :  $i$  시간대의 유입량  
 $Q(i)$ :  $i$  시간대의 사용 수량  
 $NT$ : 총 시간대의 수

(2) 유입량 모델

과거의    실측    데이터를    가지고    대수    정규    분포를  
이용하여    아래와    같은    통계    처리    과정을    거쳐  
유입량의    대표값    및    확률값을    구했다.

- a. 과거의 실측 데이터를 입력시킨다.
- b. 실측 데이터를 크기 순으로 재배열한다.

$$f(J) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot T} \cdot e^{-25 \cdot \left(\frac{\ln J - \mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.4)$$

$J$ : 하천의 유입량  
 $f(J)$ : 유입량의 확률 밀도 함수

$$\mu = \frac{1}{NT} \sum_{i=1}^{NT} \log J$$

$$\sigma = \frac{1}{NT} \sum_{i=1}^{NT} (\log J)^2 - \mu^2$$

식    (2.4)    의    대수    정규    분포    함수를    이용하여  
유입량을    자연    대수로    환산한    후    위의    대수    정규  
분포    함수의    평균치     $M$     을    식    (2.5)    로    계산한다.

$$M = \int_0^{\infty} J \cdot f(J) dJ$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-25 \cdot \left(\frac{\log J - \mu}{\sigma}\right)^2} dJ \quad (2.5)$$

식 (2.5)에서  $\text{Log}(J) = y$  지한하여 적분연산을 하면 식 (2.6)으로 구해진다.

$$M = e^{(\mu + \frac{\sigma}{2})} \quad (2.6)$$

d. 각 시구간에서의 경제지들을 계산한다.

(3) 화력 발전기의 연료비 모델 계층 내의 전 화력 발전기에 한 년간 보수 유지 계획의 자료들 사용하여 각 시간대의 화력 발전기 연료비를 결정한다. 다음 그 시간대의 동가 화력 발전기의 연료비를 구하고 이와 각 화력 발전기의 연료비 지수를 이용하여 최소 자승법으로 각 시간대에 대한 동가 화력 연료비 정수를 식 (2.7)에 보인 바와 같이 구한다.

$$iFe = iAe \cdot iPe + iBe \cdot iPe + iCe \quad [\text{원/h}] \quad (2.7)$$

- : iFe: i 시간대의 1기 동가 화력 발전기의 연료비 함수
- : iPe: i 시간대의 1기 동가 화력 발전기의 출력 [MW]
- : iAe, iBe, iCe: i 시간대의 1기 동가 화력 발전기의 연료비 정수

- (4) 부하 모델 각 시간대의 대표일을 잡아 그날의 부하 변동 지수를 크기 순으로 배열하여 부하 지속 곡선을 작성한다. 이것을 그 시간대의 대표 부하 지속 지수로 한다.
- (5) 계층의 각 제약 조건

a. 계층의 수급 균형 조건

$$iPh + iPe - iPr = 0 \quad [\text{MW}] \quad (2.8)$$

- : iPh: i 시간대의 각 수력 발전소의 출력의 합 [MW]
- : iPr: i 시간대의 부하 [MW]

b. 각 저수지의 저수량의 하한치, 상한치

$$S_j \leq S_j \leq S_j \quad (2.9)$$

c. 각 저수지의 사용 수량의 하한치, 상한치

$$Q_j \leq Q_j \leq Q_j \quad (2.10)$$

d. 각 저수지의 수력 출력의 하한치, 상한치

$$Ph_j \leq Ph_j \leq Ph_j \quad [\text{MW}] \quad (2.11)$$

e. 각 화력 발전소 출력의 하한치, 상한치

$$Pek \leq Pek \leq Pek \quad [\text{MW}] \quad (2.12)$$

(6) 목적 함수 각 시간대의 동가 화력 연료비의 합을 고할 기간동안에 대해 최소로 하는 것을 목적함수로 보았다. 이를 식 (2.13)과 같이 나타낼수 있다.

$$\text{목적 함수} = \sum_{i=1}^{NT} iF(iPe) \quad (2.13)$$

3. 확률론적인 동적 계획법의 적용 임의의 시간대 i에 있어서 동가 화력 연료비 (iFe) 및 총 동가 화력 연료비 (FT)는 1 시간대 초의 저수량 (iS)와 i 시간대 말의 저수량 (i+1S) 및 유입량 (iJ)에 대해 식 (3.1), 식 (3.2)로 나타낼수 있다.

$$iFe = iF(iS, i+1S, iJ) \quad (3.1)$$

$$FT = \sum_{i=1}^{NT} iF(iS, i+1S, iJ) \quad (3.2)$$

iJ가 각 시간대 마다 독립된 분포를 가지고 있다면 연간 총 동가 화력 연료비의 기대치는 식 (3.3)과 같다.

$$\varphi = \int \dots \int \dots \int \dots \int FT dP(iJ) \cdot dP(2J) \dots dP(NTJ) \quad (3.3)$$

i diP(iJ): i 시간대의 유입량 확률 분포 함수

(3.3)식을 D.P. 법에 적용시키기 위하여 마르코프의 다단 결정 과정에 입각한 정확식으로 변환하면 식 (3.4) 식 (3.5)와 같이 나타낼수 있다.

$$iFT = iF(iS, i+1S, iJ) + i+1FT \quad (3.4)$$

$$i\varphi = \int \dots \int \dots \int iFT dP(iJ) \cdot dP(i+1J) \dots dP(NTJ) \quad (3.5)$$

iFT: i 시간대 초에서 고할 기간 말까지의 화력 연료비의 합

iFe는 iJ만의 함수이므로 식 (3.4)을 (3.5)식에 대입하여 정리하면 식 (3.6)과 같이 된다.

$$i\varphi = \int \dots \int \{iF(iS, i+1S, iJ) + i+1\varphi\} \cdot diP(iJ) \quad (3.6)$$

이와 같이 변환 시킨후 동적 계획법을 적용하면 식 (3.7), 식 (3.8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i\phi(iS, i+1S) = \int \dots \int \{iF(iS, i+1S, iJ) + i+1\phi(i+1J)\} \cdot diP(iJ) \quad (3.7)$$

$$i\phi(iS) = \text{Min}_{(i+1S)} [i\phi(iS, i+1S)] \quad (3.8)$$

단  $NT+1\phi(NT+1S) = 0$

: iF(iS, i+1S, iJ): i 시간대의 화력 연료비

i+1\phi(i+1S): i 시간대 말에서 고할 기간 말까지의 화력 연료비 기대치의 최소값

Min [i\phi(iS, i+1S)]: D.P. 연산시 i 시간대에서의 iS를 고정하고 i+1S를 변화시켜 구한 i\phi의 최소치

본 연구에서는 위의 동적 계획법에 의한 연산에 S.A. (Successive approximation) 기법을 적용하여 각 저수지의 최적 경제운영 문제를 해석하였다.

#### 4. 작업 순서도

본 연구의 작업 순서는 그림 1에 나타난 바와 같다.

#### 5. 적용 예

적용 모델은 그림 2와 같이 3 저수지, 4 조정지의 한강 수계로 하였다. 그림 3, 그림 4는 화전과 수양장의 월간 및 주간 단위의 최적 기대 저수지 곡선을 보여주고 있다.

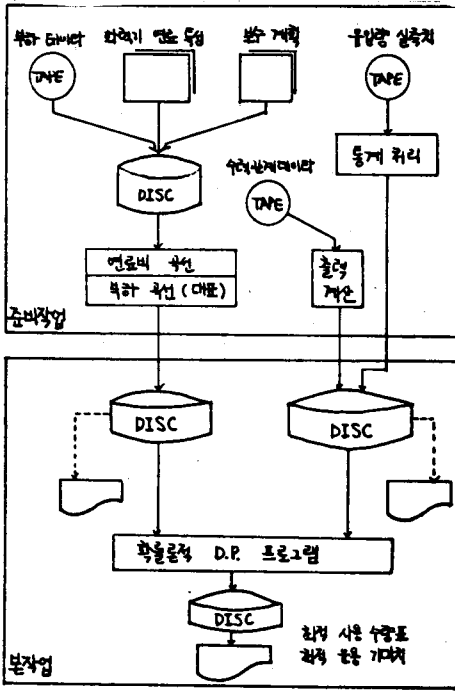


그림 1. 준비 작업 및 본 작업의 개념도

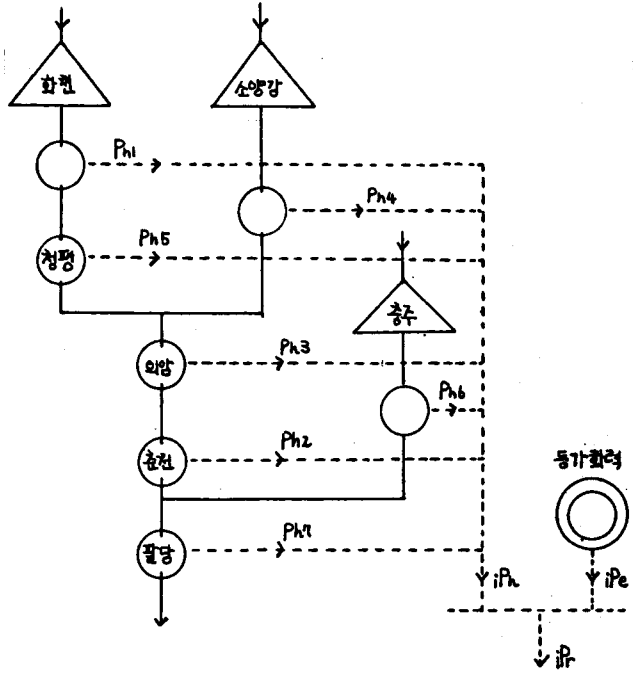


그림 2. 모델 계통도

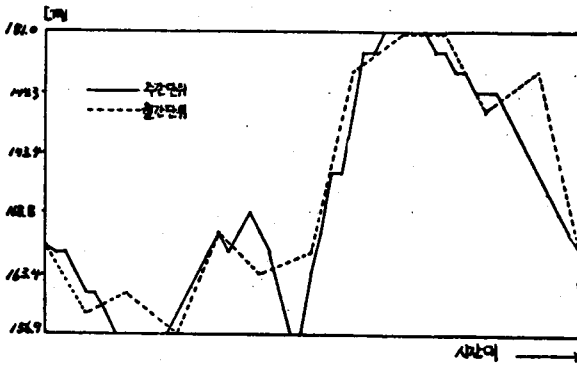


그림 3. 화전의 월간 및 주간 단위의 최적 기저 저수지 수위

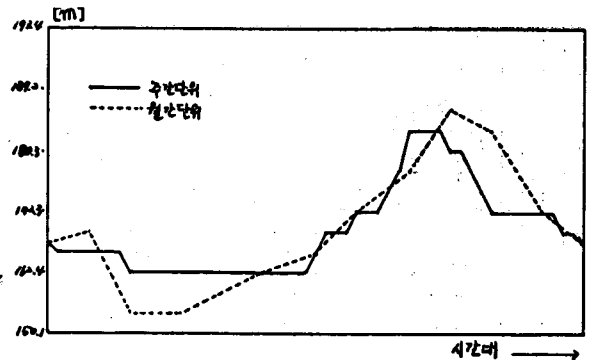


그림 4. 소양강의 월간 및 주간 단위의 최적 기저 저수지 수위

6. 결론  
본 연구의 적용 사례를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.  
(1) 확률론적인 동적 계획법을 적용함으로써 더욱 현실성을 기하였다.  
(2) 시간 단위를 주간 단위로 하므로써 보수 계획을 더욱 현실적으로 고려할 수 있게 되어 실제 저수지를 보다 정확하게 운용할 수 있었다.  
(3) 주간의 출수량이 결정되므로 주간 경제 운용계획을 수립하는데 유용하게 사용되리라 기대된다.

7. 참고 문헌  
(1) 송길영, "전력 계통의 해석 및 운용", 동일 출판사, 1983  
(2) 한국 기술 연구원 연구보고서, "수력 발전소의 합리적 운용 프로그램 개발 연구", 1987

(3) M. E. EL-Hawary, G. S. Christensen, "Optimal Economic Operation of Electric Power Systems", Academic Press, 1979  
(4) A. J. Wood, B. F. Wollemberg, "Power Generation Operation and Control", John Wiley & Sons, 1984  
(5) R. E. Belman 외, "Applied Dynamic Programming", Princeton University Press  
(6) V. R. Sherkat 외, "Stochastic Long-term Hydrothermal Optimization For A Multireservoir System", IEEE Trans, Vol. PAS 104, August 1985