

한강 수계의 연간 경제운용 계산

송길영, 김영태  
(고려대학교)

임주일, 홍상은  
(한전기술연구원)

Yearly Economic Operation of Han-River Hydro system

Song Kil Yeong, Kim YeongTai  
(Korea University)

Lim Ju Il, Hong Sang Eun  
(KEPCO Research Center)

1. 서론

우리나라의 전력설비는 1986년 말 현재 약 18,000 [MW]로 이중 수력설비는 12.3%인 2,225 [MW]이지만 년 최대 렘두 부하를 10,000 [MW]로 예상할때 계통내 수력설비의 점유율은 20% 이상을 차지하게 되므로 그 운용방법에 따라서는 계통운영에 미치는 영향이 대단히 크다.

일반적으로 화력발전은 년간 보수 계획, 연료 확보 및 소비, 연료비 변동 등의 운용조건을 생 각할 수 있는데 반해 수력 발전은 생활 및 농, 공업 용수의 공급, 홍수 예방, 관광, 강우상황, 연접수계운용 등 화력에서 볼 수 없는 다양한 운용 조건을 가지고 있어 경제운용 계산시 상당한 어려움을 안고 있다. 더우기 수학적계통에서 수력발전 단독으로는 경제성 평가가 곤란하므로 화력 발전과의 협조 운용을 통해서 만이 경제 운용의 의미를 가지게 된다.

이와같은 수학적 계통의 경제운용 문제에 대 해서는 그간 수많은 연구가 진행되어 왔으나 그 대부분이 상기한 제약조건, 부하 및 유입량의 불확실성 등의 처리가 용이한 최적기법 개발에 집중되어 왔다.

본 연구에서는 우리나라 유일의 연접수계인 한강수계를 대상으로 수학적 협조를 통한 년간 경제운용 계산을 위한 한강수계의 수리모형을 확립하고, 상기한 제약조건 및 유입량의 확률 특성 등의 처리가 용이한 동적계획법을 이용한 전산프로그램을 개발한바 있어 그 결과를 소개 하고자 한다.

2. 한강수계의 수리모형

2.1 한강수계의 구성

한강수계는 3개의 대형 저수지의 4개의 조 정지, 1개의 양수 발전소를 구성되어 있으며,

총설비용량은 1,370 [MW]로서 총수력 용량의 62%를 점하고 있다.

그림1은 한강수계의 구성도를 나타낸것이다.

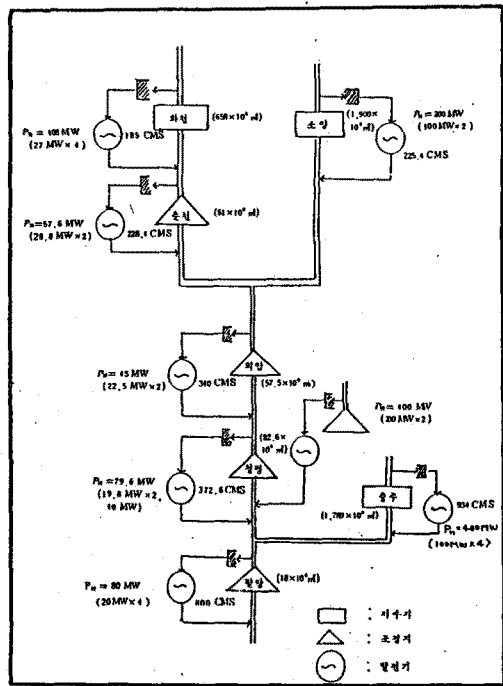


그림1 한강수계의 구성도

2.2 설비특성 및 운용 모형

1) 수력설비 모형

각계수 산출은 P-Q 특성, S-H 특성에 따 른다.

○ 수력 출력 모형 ;  $P_H = H \cdot D$  (1)

○ 저수지 모형 ;  $S(n+1) = S(n) + J(n)$

$- Q_2(n) + \delta_{23} \cdot Q_3(n)$  (2)

○ 제약 조건

- 저수량 ;  $S \leq S \leq \bar{S}$  (3)
- 사용수량 ;  $Q \leq Q \leq \bar{Q}$  (4)
- 출력력 ;  $P_H \leq P_H \leq \bar{P}_H$  (5)
- 제한수의 ;  $H \leq H \leq \bar{H}^*$  (6)
- 책임방류량 ;  $Q^* \geq Q_w$  (7)

2) 화력 예비 모형

- 연료비 ;  $F = (A + B \cdot P_B + C \cdot P_B^2) \cdot d$  (8)
- 제약조건
- 출력력 ;  $P_B \leq P_B \leq \bar{P}_B$  (9)
- 예비력 확보 ;  $SR = \gamma \cdot \{\max P_B\}$  (10)

3) 수급 평형

$$Q_B = P_R - \sum P_B - \sum P_H = 0 \quad (11)$$

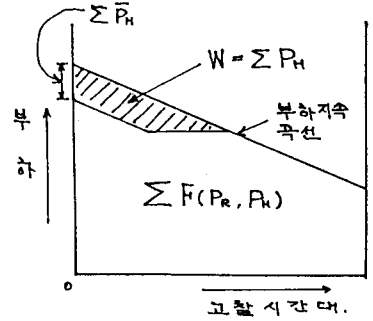


그림 3. 고찰시간대 연료비 계산

2.3 연료비 계산

1) 등가 화력 연료비 계산

보수 계획 및 예비력 확보 조건을 고려한 등가 화력 연료비 곡선의 산출은 그림2와 같은 절차로 계산한다.

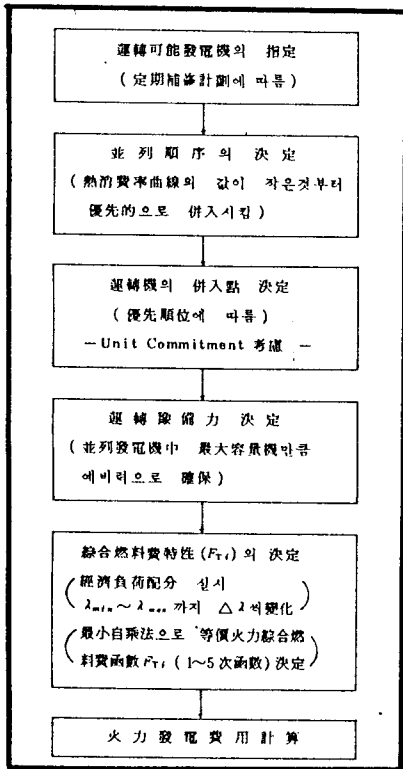


그림 2. 등가 화력 연료비 계산 흐름도

2) 고찰시간대별 연료비 계산

고찰시간대별 연료비 계산은 고찰시간대의 총 수력발전량과 등가 화력 연료비 곡선을 이용하여 부하 지속 곡선에 의해 그림 3과 같이 계산한다.

3. 동적 계획법의 적용

3.1 확률론적 동적 계획법

본 연구의 연간 경제용량 계산에서는 유입량의 예측이 불확실하므로 과거 유입량 통계 데이터를 이용한 확률분포를 파악한 후 주어진 계층 부하 패턴 및 각 시간대의 유입량 확률분포에 대하여 연간 총 화력 연료비의 기대치를 최소화하는 확률론적 동적 계획법을 적용하였다. 연간 총 화력 연료비 ( $F_T$ ) 기대치는 식(12)와 같다.

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} F_T \cdot d_1 P(J_{(1)}) \cdot d_2 P(J_{(2)}) \dots d_n P(J_{(n)}) \quad (12)$$

Bellman의 최적성의 원리를 도입하여 식(12)를 변환하면 식(13)과 같이 된다.

$$\Phi(S(n), S(n+1)) = \min \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} [F(S(n), S(n+1), J(n)) + \Phi(S(n+1))] d_n P(J(n)) \right\} \quad (13)$$

그림 4 및 그림 5는 확률론적 DP법의 개념도 및 기대치 계산의 개념도를 나타낸 것이다.

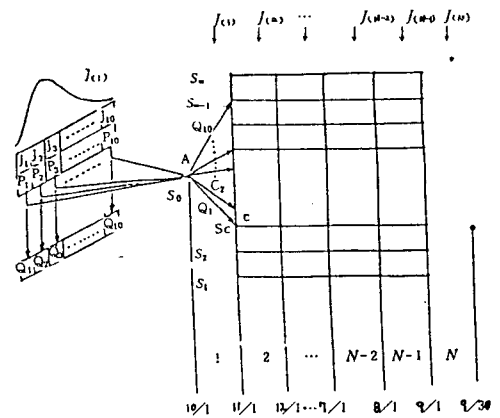


그림 4. 확률론적 DP법의 개념도

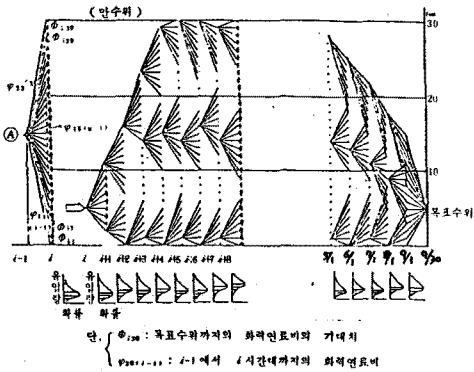


그림 5. 최다사용 수량과 거대저 계산의 개념도

3.2 제한조건의 고려

확률론적 동적계획법을 이용하여 경제운용 계산을 할 때는 그림 6과 같이 응용 제한조건을 위반하는 경우 예한해 가정된 시간대별 저수량을 수정하여 제한에 이르지 않도록 할 수 있다.

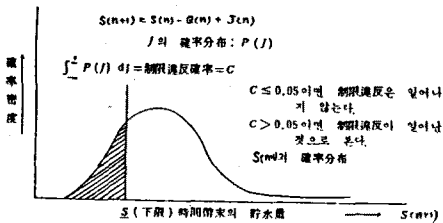
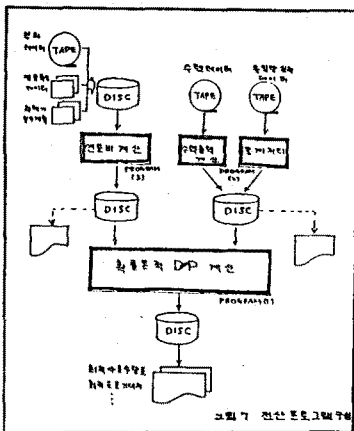


그림 6. 저수량 하한 제한조건을 고려할 경우

4. 전산프로그램

개발된 전산프로그램은 1) 확률론적 동적계획법을 적용한 프로그램, 2) 유입량의 통계처리를 위한 프로그램, 3) 화력연료비 계산에 의한 프로그램 등 3개의 프로그램으로 구성되어 각 프로그램간의 연계는 그림 7과 같다.



5. 계산조건 및 입력데이터

5.1 계산조건

- 1) 결정변수는 저수량으로 하였다.
- 2) 고찰기간은 일단의를 1시간대로 하여 전 고찰기간을 12시간대로 하였다.
- 3) 확률론적 동적계획법에는 후진형 계산법을 적용하였으며 화전, 소양, 홍주 저수지의 거주점은 각각 16개를 잡았다.
- 4) 유입량은 대수정규분포를 이룬다고 보고 과거 실적치(10-30년간)를 통계처리하여 각 일의 대표치의 최대치와 최소치와의 범위를 5등분하여 각 일에 대하여 각각 5개씩의 유입량 값을 사용하였다.

(단) 홍주 저수지는 유입량 실적치가 작기 때문에 결정론적으로 취급하여 평균치를 적용하였다.

- 5) 확률론적으로 취급하는 저수지의 제한조건으로는 각 시간대 말 목표저수량에 대하여 허용범위를 단의 거주점 간격의 ±0.2배로 설정하고, 책임 방류량에 대한 허용 제한의 반박률은 0.1로, 저수지 하한에 대한 허용 제한의 반박률은 0.1을 적용하였다.
- 6) 각 반복 계산시 화력연료비의 변화가 0.0001 이내에 들면 계산종료하였다.
- 7) 송전손실은 무시하였다.
- 8) 조정지(춘천, 청평, 의암, 팔당)는 항상 만수상태이며 사용수량에 의한 유효낙차의 변화는 무시하였다.
- 9) 조정지에서 최대 사용수량이상의 유입량이 발생하면 그 차만큼 입수하고 이때의 수차발전기는 최대 사용수량으로 운전하는 것으로 하였다.
- 10) 홍수기 제한수의 유지 기간은 7, 8, 9일로 국한하였다.

5.2 입력 데이터

1) 부하 데이터

과월의 대표 일부 하 부하 동국선용 평일 및 일요일 일부 하국선용 채택하여 과월에 대한 등가적인 대표 일부 하국선과 대표 일부 하 저수국선을 작성하여 부하 데이터로 사용하였다.

2) 화력기 연료비 부속 데이터

과월별 프로그램 2와 같은 순서로 동가연료비 국선을 산출한다. 이때 과 화력기 연료비 부속 데이터는 현재 한전 경제 급전에서 사용하는 데이터를 사용하였다.

3) 화력기 보수 계획 데이터

화력기 보수 계획은 한전에서 작성한 년간보수

계획 데이터를 사용하였다.

#### 4) 수력 데이터

수력데이터는 발전기 P-Q 곡선과 저수지 S-H 곡선 데이터를 사용하였으며 1개 수력 발전소에는 1개 발전기로 동기화하였다.

#### 5) 유입량 실적 데이터

유입량 실적은 과거 (10-30년) 실적 데이터틀 사용하였다.

← 注: 수력 발전소

PERIOD - 9월												
INFLOW PROP	28.47		74.73		144.82		279.44		432.41		632.41	
	0.16		0.23		0.31		0.37		0.41		0.45	
LEVEL	0111	0111	0121	0121	0131	0131	0141	0141	0151	0151	0151	0151
0.0	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3	24.3
45.0	24.3	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
79.1	24.3	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1	79.1
125.1	24.3	125.1	125.1	125.1	125.1	125.1	125.1	125.1	125.1	125.1	125.1	125.1
189.2	24.3	189.2	189.2	189.2	189.2	189.2	189.2	189.2	189.2	189.2	189.2	189.2
235.2	24.3	235.2	235.2	235.2	235.2	235.2	235.2	235.2	235.2	235.2	235.2	235.2
295.3	24.3	295.3	295.3	295.3	295.3	295.3	295.3	295.3	295.3	295.3	295.3	295.3
335.4	24.3	335.4	335.4	335.4	335.4	335.4	335.4	335.4	335.4	335.4	335.4	335.4
375.5	24.3	375.5	375.5	375.5	375.5	375.5	375.5	375.5	375.5	375.5	375.5	375.5
415.6	24.3	415.6	415.6	415.6	415.6	415.6	415.6	415.6	415.6	415.6	415.6	415.6
455.7	24.3	455.7	455.7	455.7	455.7	455.7	455.7	455.7	455.7	455.7	455.7	455.7
495.8	24.3	495.8	495.8	495.8	495.8	495.8	495.8	495.8	495.8	495.8	495.8	495.8
535.9	24.3	535.9	535.9	535.9	535.9	535.9	535.9	535.9	535.9	535.9	535.9	535.9
576.0	24.3	576.0	576.0	576.0	576.0	576.0	576.0	576.0	576.0	576.0	576.0	576.0
616.1	24.3	616.1	616.1	616.1	616.1	616.1	616.1	616.1	616.1	616.1	616.1	616.1
656.2	24.3	656.2	656.2	656.2	656.2	656.2	656.2	656.2	656.2	656.2	656.2	656.2
696.3	24.3	696.3	696.3	696.3	696.3	696.3	696.3	696.3	696.3	696.3	696.3	696.3
736.4	24.3	736.4	736.4	736.4	736.4	736.4	736.4	736.4	736.4	736.4	736.4	736.4
776.5	24.3	776.5	776.5	776.5	776.5	776.5	776.5	776.5	776.5	776.5	776.5	776.5
816.6	24.3	816.6	816.6	816.6	816.6	816.6	816.6	816.6	816.6	816.6	816.6	816.6
856.7	24.3	856.7	856.7	856.7	856.7	856.7	856.7	856.7	856.7	856.7	856.7	856.7
896.8	24.3	896.8	896.8	896.8	896.8	896.8	896.8	896.8	896.8	896.8	896.8	896.8
936.9	24.3	936.9	936.9	936.9	936.9	936.9	936.9	936.9	936.9	936.9	936.9	936.9
977.0	24.3	977.0	977.0	977.0	977.0	977.0	977.0	977.0	977.0	977.0	977.0	977.0
1017.1	24.3	1017.1	1017.1	1017.1	1017.1	1017.1	1017.1	1017.1	1017.1	1017.1	1017.1	1017.1
1057.2	24.3	1057.2	1057.2	1057.2	1057.2	1057.2	1057.2	1057.2	1057.2	1057.2	1057.2	1057.2
1097.3	24.3	1097.3	1097.3	1097.3	1097.3	1097.3	1097.3	1097.3	1097.3	1097.3	1097.3	1097.3
1137.4	24.3	1137.4	1137.4	1137.4	1137.4	1137.4	1137.4	1137.4	1137.4	1137.4	1137.4	1137.4
1177.5	24.3	1177.5	1177.5	1177.5	1177.5	1177.5	1177.5	1177.5	1177.5	1177.5	1177.5	1177.5
1217.6	24.3	1217.6	1217.6	1217.6	1217.6	1217.6	1217.6	1217.6	1217.6	1217.6	1217.6	1217.6
1257.7	24.3	1257.7	1257.7	1257.7	1257.7	1257.7	1257.7	1257.7	1257.7	1257.7	1257.7	1257.7
1297.8	24.3	1297.8	1297.8	1297.8	1297.8	1297.8	1297.8	1297.8	1297.8	1297.8	1297.8	1297.8
1337.9	24.3	1337.9	1337.9	1337.9	1337.9	1337.9	1337.9	1337.9	1337.9	1337.9	1337.9	1337.9
1378.0	24.3	1378.0	1378.0	1378.0	1378.0	1378.0	1378.0	1378.0	1378.0	1378.0	1378.0	1378.0

### 6. 계산 결과

한강수계에서 저수지에 속하는 최천, 소양, 충주 발전소에 대한 계산결과도 그림 7과 같은 최적 기대 저수지 곡선을 얻었으며 이를 이용한 각 시간대별 총사용수량 표(소양외 경우)는 그림 8과 같이 나타내었다.

그림 8. 시간대별 총사용수량표 (예)

### 7. 결론

- 1) 한강계 년간 경제 운용 계산을 위한 대상 심비의 수리모형을 확립하였다.
- 2) 연료비 계산에서 호아력 발전기는 최적 계산의 효율을 높이기 위하여 1개 등가 종합연료비 모형을 시뮬레이션 기법을 도입하였다.
- 3) 수력운용에서 가장 문제가 되는 유입량의 불확실성을 고려한 확률론적 동적 계획법을 적용함으로써 수력 운용 계획 수립과 시행을 효율적으로 수행할 수 있는 계산 결과들을 얻을 수 있었다.
- 4) 본 연구에서 개발된 프로그램은 한전에 설치된 새로운 경제급전 시스템(EMS)에 연결하여 수학적 운용 계획 작성에 적용할 예정이다.

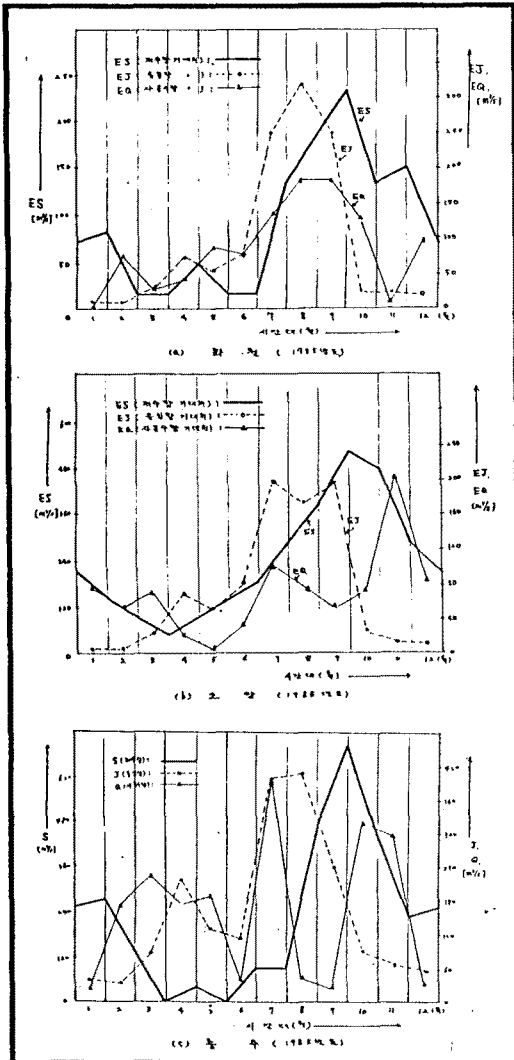


그림 7. 최적기대 저수지 곡선 계산 결과

### 참고 문헌

1. 한전 기술연구원 연구보고서, "수력 발전소의 합리적인 운용프로그램 개발연구", 1986. 6.
2. 한전 기술연구원 연구보고서 "부하곡선 조사연구" 1986. 10,
3. 한전 한강수력발전처, "수문자료집", 1986
4. 한전 발전처, "전력계통 운용 자료집", 1986,
5. S.Tsuzuki, "유입량 확률 분포를 고려한 년간 저수지 운용의 예식"
6. M.E. El-Hawary, "Optimal Economic Operation of Electric Power Systems" Academic Press, 1979.
7. R.E.Larson의 "A Dynamic Programming Successive Approximations Technique with Convergence Proofs" Automatica, Vol, 6 PP245-252, 1970.
8. G.L.Nembauser, "Introduction to Dynamic Programming", John Wiley and Sons Inc, 1966.
9. R.Bellman의, "Applied Dynamic Programming" Princeton University Press, 1962.