

# SSSDP 기법에 의한 저수지 시스템의 최적운영

沈 淳 輔\*

南 顯 玉\*\*

1. 서 론  
저수지의 운영은 불확정성의 유입량을 거치는 저류수의 시간변동에 따른 동적배분에 관한 문제이며, 저수지의 최적운영은 하천 수계 내에서의 저수지로의 유입-저류-방류에 따른 사용수량으로 인한 극대 편익을 구하고 홍수조절 효과의 결과로 나타날 홍수 피해의 최소화를 기하는 문제이다.
- 이러한 문제에 대한 연구 동향으로는 Bellman이 1957년 다단계 정책 결정에 대한 최적해의 방법으로서 동적 계획법을 제안한 이래 Askew, Buras, Hall, Bather, Becker, Butcher, Collins, Fitch, Liu, Jacoby, Moore, Morin, Roefs, Takeuchi, Tauxe, Yakowitz, Yeh, Young 등에 의하여 수자원 시스템 및 저수지의 계획이나 운영 시스템에 광범위하게 DP기법이 도입 활용되어 왔다.
- 또한 저수지 최적 운영의 초기 임팩 조건인 저수지 유입수는 실제로 추계학적 특성을 갖는 점을 중요시하여 Amir, Arunkumar, Butcher, Croley, Derman, Dudley, Gal, Labadie, Maidment, Ross, Torabi, Houck, Turgeon, Hasam, Hirsch, Singh 등에 의하여 여러 형태의 추계학적 DP기법을 제안, 개발하여 오고 있다.
- 본 연구에서는 저수지 시스템의 자연적 특성에 실제로 부합되고 실시간 변동하에서 저수지 시스템에 대한 최적 운영이 실용적으로 이루어질 수 있도록 steady-state stochastic dynamic programming

---

\* 충북 대학교 토목공학과 부교수, 기술사

\*\* 충북 대학교 대학원 토목공학과 석사과정 졸업

(SSSDP) 기법을 채택하여 우리나라 하천의 한 저수지에 대한 최적 방류량을 구하였다.

## 2. SSSDP 기법

저수지의 유입량을 Markov 과정으로 볼때 1계 Markov 과정은 전 단계의 시스템 상태와 주어진 확률로서 현 단계의 시스템 상태를 구하는 추계학적 과정이다.

일반적으로 다단계 Markov 모델은 기대 Return을 최대하므로 저수지 최적화 모델에 적용되는 추계학적 동적 프로그래밍의 형식은 식 (1)과 같다.

$$f_t(S_t, I_{t+1}) = \text{Max}_{R_t} \left\{ \sum_{I_t=0}^{I_t=I_t, \max} P[I_t | I_{t+1}] \cdot [\bar{R}(R_t) + f_{t-1}(S_{t-1}, I_t)] \right\}$$

.....(1)

$$S_{t-1} = S_t + I_t - R_t - E_t$$

$$f_1(S_1, I_2) = \text{Max}_{R_1} \left\{ \sum_{I_1=0}^{I_1=I_1, \max} P[I_1 | I_2] \cdot [\bar{R}(R_1)] \right\}$$

여기서

$f_t(S_t, I_{t+1})$  = 시간 t에서의 시스템의 최적 운영에 따른 기대 Return

$S_t$  = 시간 t의 초기 저류량

$I_t$  = 시간 t의 유입량

$\bar{R}$  = 시간 t의 방류량  $R_t$ 에서 얻어지는 Return

$P[I_t | I_{t+1}]$  = 시간 (t+1)에서 유입량  $I_{t+1}$ 로 t시간의 유입량  $I_t$ 와 접하는 변환 확률

$E_t$  = 시간 t 동안 증발로 인한 손실량

위의 Recursive Equation으로 주어진 시간의 유입량이  $I_{t+1}$ 일 때 현시간의  $I_t$ 의 발생 기회를 나타내는 조건 확률  $P[I_t | I_{t+1}]$ 을 이용하여 현 시간 t의 초기에 주어진 저류량  $S_t$ 와 시간 (t+1)에서의 유입량  $I_{t+1}$ 에 대해 기대 Return이 최대인 방류량을 얻는다.

다음과 같은 시간 저포를 정의하면

$T$  = Cycle 당 시간의 수

$t$  = 시간수  $T$ 를 가진 cycles

$m$  = 첫 cycle 을 zero로 하여 계획유 의 수준 끝까지의 cycle수

$n$  = 계획 유 의 수준 끝까지 시간수

여기서 한 cycle은 1년을 뜻하고 각 시간 기간을 뜻한다.

월  $t$ 에 대한 상태 변수는 다음과 같이 정의한다.

$S_i^t$  =  $t$ 월의 초기 저류량으로  $i$ 번째 어산값과 같다.

$Q_j^{m+1}$  =  $j$ 번째 어산값과 같은 시간  $(m+1)$ 의 유입량이고,

$P_{JK}^m$  = 유입량 변화함수로서  $(m+1)$ 시간에서 유입량이  $j$ 일때  $m$ 시간의 유입량  $k$ 가 발생할 확률이다.

또한 Periodic Stationary System 에 대하여 식(2), (3)의 조건식이 성립한다.

$$E[Q_j^{mT+t}] = E[Q_j^t] \quad ; \quad \forall i, j, t \quad \text{-----}(2)$$

$$P_{JK}^{mT+t} = P_{JK}^t \quad ; \quad \forall j, k, m, t \quad \text{-----}(3)$$

조건식 (2), (3)을 사용하여  $R^m, L_t, g_m, r, S_{max}, S_{min}, f_m$ 를 다음과 같이 정의한다.

$R^m(S_i^t, Q_j^{t+1})$  = 저류량이  $S_i^t$ 이고 유입량이  $Q_j^{t+1}$ 이며  $n(=mT+t)$  시간일때  $t$ 월에 대한 최적 방류량

$L_t(S_i^t, Q_k^t, R)$  = 초기 저류량이  $S_i^t$ 이고 유입량이  $Q_k^t$ , 방류량이  $R$ 일때  $t$ 월에 대한 저수지의 손실량

$g_m(S_i^t, Q_k^t, R)$  = 초기 저류량이  $S_i^t$ 이고 유입량이  $Q_k^t$ , 방류량이  $R$ 일때  $n(=mT+t)$  시간에 저수지 운영에 소요되는 비용

$r$  = 매월의 감가상각비

$S_{max}$  = 저수지 최대 저류량

$S_{min}$  = 저수지 최소 저류량

$f^n(S_i^t, Q_j^{t+1}) = t$ 월의 시스템 상태  $(S_i^t, Q_j^{t+1})$ 에서 현 시간부터 계획유역의 수준까지의 최소 거래 비용

또한 정상상태 시스템의  $g(\cdot)$ 에 대하여 다음 조건이 성립한다.

$$g_{m,t,t}(S_i^t, Q_k^t, R) = g_t(S_i^t, Q_k^t, R); \forall m, t, i, k$$

따라서 식(2), (3), (4)를 만족하면 정상상태의 최적 방류량 -----(4)  
결정은 식(5)과 같다.

$$f^n(S_i^t, Q_j^{t+1}) = \underset{R}{\text{Min}} \left[ \sum_k P_{jk}^t \{ g_t(S_i^t, Q_k^t, R) + \beta \cdot f^{n-1}(S_k^{t+1}, Q_k^t) \} \right] \text{-----}(5)$$

$$t = 1, 2, \dots, 12$$

$$t = 12 \text{이면 } t+1 = 1$$

$$t = 1 \text{이면 } t-1 = 12$$

여기서

①  $S_{\min} \leq S_k^{t+1} \leq S_{\max}$  일때

$$R = S_i^t - S_k^{t+1} + Q_k^t - L(S_i^t, Q_k^t, R) \text{ 이고}$$

②  $S_k^{t+1} > S_{\max}$  이면

$$S_k^{t+1} = S_{\max}$$

$$R = S_i^t + Q_k^t - S_{\max} - L(S_i^t, Q_k^t, R)$$

③  $S_k^{t+1} < S_{\min}$  이면

$$S_k^{t+1} = S_{\min}$$

$$R = S_i^t + Q_k^t - S_{\min} - L(S_i^t, Q_k^t, R)$$

저수지 시스템에서 목적하는바, 즉 홍수조절, 용수공급, 발전등을 위한 방류량을 결정하고 이 방류량에 따라 전체 저수지 시스템의 운영 총 비용을 계산하는 목적함수식은 식(6)과 같이 나타낼수 있다.

$$g_t(\cdot, \cdot, R) = a_1 (R - T_w)^{b_1} + a_2 (T_E^t - P)^{b_2} + a_3 (T_F^t - R)^{b_3} \text{-----}(6)$$

외거서

$g_t(\cdot, \cdot, R) =$  초기 저류량과 현 기간의 유입량이  $(\cdot, \cdot)$  이고 방류량이  $R$  일때  $t$ 월 동안 용수공급, 발전, 홍수조절 등에 드는 비용

$T_w =$  용수 공급을 위한 방류량

$T_E = t$ 월 동안의 목표 전력량

$P = t$ 월 동안 생산된 전력량

$T_R^t = t$ 월의 목표 홍수 조절량

$R \geq 0$

$a_1, a_2, a_3 =$  우열 순위 (trade off) 계수 ( $\geq 0$ ) 이며 우열 순위에 제약조건을 부과하면

① 비 홍수기 일때

$$T_R^t < T_E^t < T_w$$

② 홍수기 일때

$$T_w < T_E^t < T_R^t$$

로 결정한다.

또한  $R \leq T_w$  일 때는  $a_1 = 0,$

$T_R^t \leq P$  일 때는  $a_2 = 0,$

$T_R^t \leq R$  일 때는  $a_3 = 0$

로 한다.

$b_1, b_2, b_3 =$  용수공급, 수력발전, 홍수조절의 중요도를 나타내는 계수 ( $\geq 1$ )로서 경험적으로  $b_1 = b_2 = b_3 = 2$ 를 택한다.

### 3. SSSDP 해법

#### 1) Algorithm

i. 저수지의 특성자료 및 실시간에 대한 초기치, 현재치를 읽는다.

ii. 매 저류량별로 저수위를 계산

$$\delta = (S_t^{\max} - S_t^{\min}) / (M - 2)$$

$$S_j = S_{\min} + \delta \cdot (M - 2 + 1.5 - j) \quad \forall_j$$

$$H = 43.6745 \cdot S^{0.1512} \quad (H: \text{수위}, S: \text{저류량})$$

iii. 경제최 조건에 따른 제산을 한다.

$$f^0(S_i^t, Q_j^{t+1}) = 0$$

$$\text{iv. 식 } f^m(S_i^t, Q_j^{t+1}) = \text{Min}_R \left[ \sum_k P_{jk}^t \{ g_t(S_i^t, Q_k^t, R) + \beta \cdot f^{m+1}(S_i^{t+1}, Q_k^t) \} \right]$$

을 사용하여 방류량의 반복시행을 한다.

v. 주어진 최대방류량으로부터 초기 최적 방류량을 계산

vi. 저류량 계산 ;

$$S_i^{t+1} = S_i^t + Q_k^t - R - L(S_i^t, Q_k^t, R)$$

vii. Convergence Test

$$\lim_{m \rightarrow \infty} f^{(m+1)T+t}(S_i^t, Q_j^{t+1}) - f^{mT+t}(S_i^t, Q_j^{t+1}) = C$$

;  $\forall_i, j, t$

viii. 각 상패에 대한 최적 방류량을 계산

$$\textcircled{1} S_{\min} \leq S_i^{t+1} \leq S_{\max} \text{ 일때}$$

$$R = S_i^t - S_i^{t+1} + Q_k^t - L(S_i^t, Q_k^t, R)$$

$$\textcircled{2} S_i^{t+1} > S_{\max} \text{ 일때}$$

$$S_i^{t+1} = S_{\max}$$

$$R = S_i^t + Q_k^t - S_{\max} - L(S_i^t, Q_k^t, R)$$

$$\textcircled{3} S_i^{t+1} < S_{\min} \text{ 일때}$$

$$S_i^{t+1} = S_{\min}$$

$$R = S_i^t + Q_k^t - S_{\min} - L(S_i^t, Q_k^t, R)$$

2) 흐름도

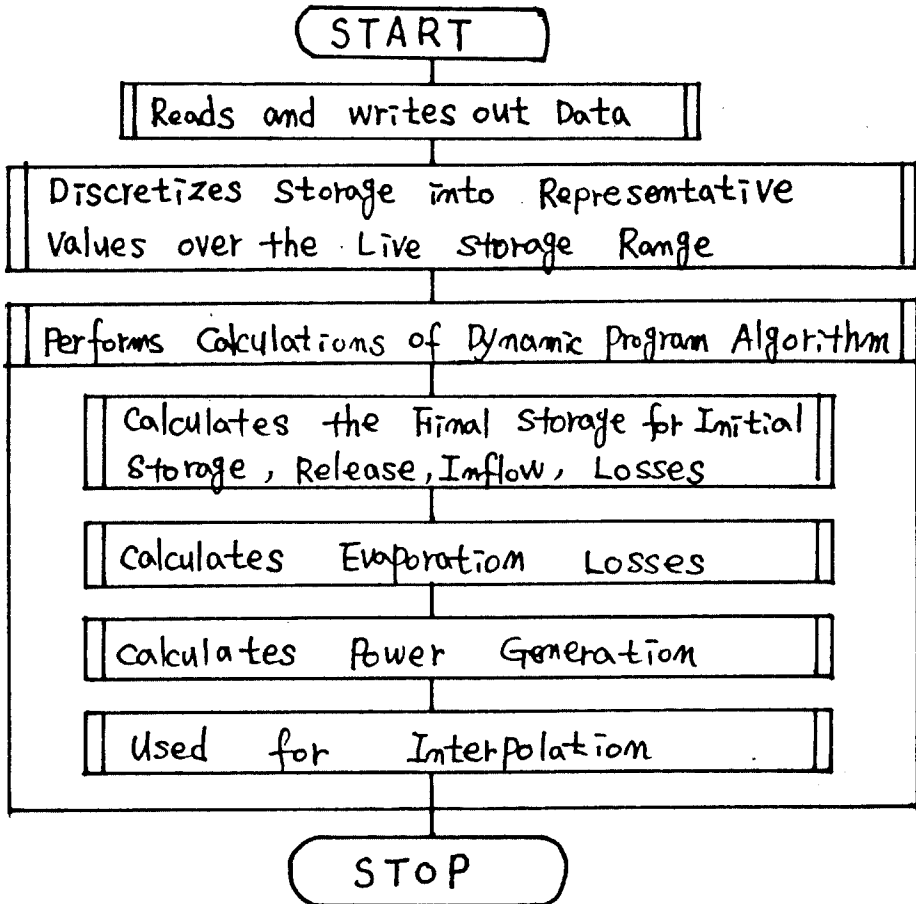


Fig.1. Main flow chart

#### 4. 적용 및 고찰

어느 하천 지역의 한 다목적 댐이 Fig. 2 와 같은 용량배분 계획으로서 운영되어야 할때 이 저수지 시스템의 최적 운영을 위하여 SSSDP 기법을 적용하였다.

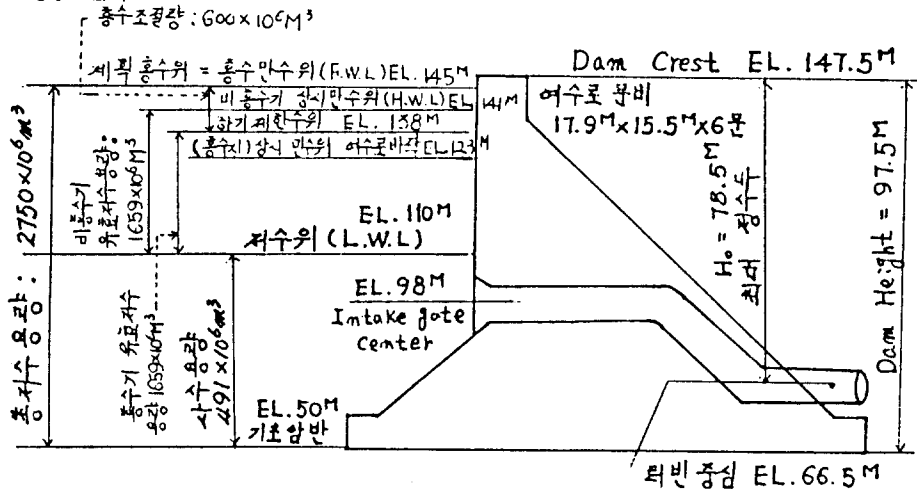


Fig. 2. 다목적 댐 용량배분도 (계획)

입력자료 (Table 1, 2 참조)로 처리한 결과 월별 운영 방책으로서 저류 수위와 유입량에 따른 발전량 (Table 3), 방류량 (Fig. 3, 4)을 구하였다.

Table 1. Reservoir Characteristic Data

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	sep.	oct.	Nov.	Dec.
Water supply Target ( $10^6 m^3$ )	130	110	130	130	150	160	150	160	140	140	130	130
Energy Targets (CGWH)	50	50	70	70	70	70	127	127	127	45	45	45
Evaporation Rates (MM)	32.2	45.8	75.8	98.5	129.8	149.4	141.7	127.7	94.5	70.3	45.6	34.7
Maximum Release ( $10^6 m^3 / Month$ ) : 2200 Critical Release ( $10^6 m^3 / Month$ ) : 1700 Maximum storage ( $10^6 m^3$ ) : 2750 Minimum storage ( $10^6 m^3$ ) : 490 Discount Rate : 0.0												



TABLE 2. MONTHLY INFLOWS (10<sup>6</sup> M<sup>3</sup>)

JAN	107.6	108.9	191.1	168.1	165.0
FEB	164.1	180.1	163.0	189.4	165.4
MAR	168.1	279.0	160.0	234.5	233.5
APR	193.0	188.7	842.5	681.0	555.6
MAY	321.9	249.8	797.6	398.1	338.6
JUN	130.6	273.3	590.0	1286.8	250.1
JUL	185.2	1707.3	2493.2	741.5	1302.3
AUG	1117.5	389.8	1782.9	1677.1	1054.9
SEP	236.6	1089.5	1119.5	486.3	839.4
OCT	177.8	139.6	175.1	129.0	191.9
NOV	191.9	190.5	103.0	109.5	151.1
DEC	222.6	242.2	196.3	198.5	110.2

TABLE 3. MONTHLY POWER GENERATION (GWH)

STORAGE (10 <sup>6</sup> M <sup>3</sup> ) (ELEVATION (M))	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2750.0 (144.6)	140	143	147	147	151	152	165	159	159	143	143	144
2700.9 (144.2)	142	143	143	146	150	150	164	158	159	142	139	143
2602.6 (143.4)	137	138	139	142	145	148	164	156	154	138	135	138
2504.3 (142.6)	137	134	137	138	144	147	162	155	153	134	134	134
2406.1 (141.7)	134	134	135	138	140	145	160	154	149	134	134	134
2307.8 (140.8)	134	134	134	138	139	145	159	152	148	134	134	134
2209.6 (139.9)	133	130	133	133	135	143	157	149	148	129	129	130
2111.3 (139.0)	133	129	133	133	135	142	153	147	148	129	129	129
2013.0 (138.0)	131	129	130	133	134	142	153	146	146	129	129	129
1914.8 (136.9)	129	129	129	133	134	141	152	142	144	129	129	129
1816.5 (135.8)	127	125	128	128	130	139	152	139	144	124	124	124
1718.3 (134.7)	127	124	128	128	130	137	151	139	144	124	124	124
1620.0 (133.5)	124	124	125	128	129	136	149	133	140	124	124	124
1521.7 (132.3)	123	122	123	124	126	135	149	130	139	120	120	121
1423.5 (130.9)	123	120	123	124	125	133	147	129	139	120	120	120
1325.2 (129.5)	120	120	121	124	125	131	145	129	135	120	120	120
1227.0 (128.0)	119	116	119	119	121	129	144	127	134	115	115	116
1128.7 (126.4)	117	115	116	119	121	128	141	124	134	115	115	115
1030.4 (124.7)	115	115	115	119	120	127	140	123	130	115	115	115
932.2 (122.8)	114	110	114	114	116	123	137	119	130	110	110	110
833.9 (120.8)	110	110	110	114	115	122	135	118	125	110	110	110
735.7 (118.5)	108	106	109	110	112	119	132	115	125	106	106	106
637.4 (115.9)	105	102	105	105	107	115	130	112	120	101	101	102
539.1 (113.0)	101	101	101	105	106	113	126	109	116	101	101	101
490.0 (111.4)	101	101	101	101	104	111	122	115	116	101	101	101

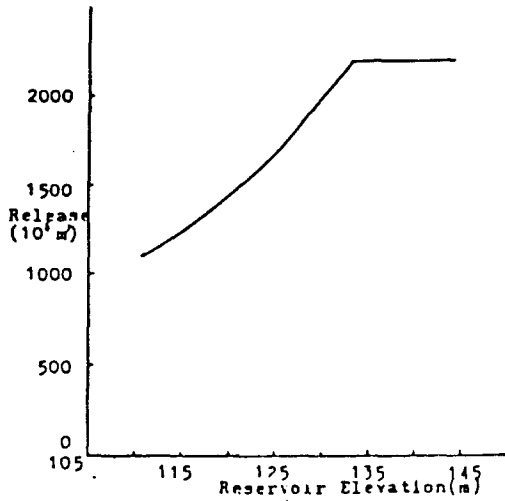


FIG. 3.1 STEADY-STATE RELEASE POLICY OF AUGUST

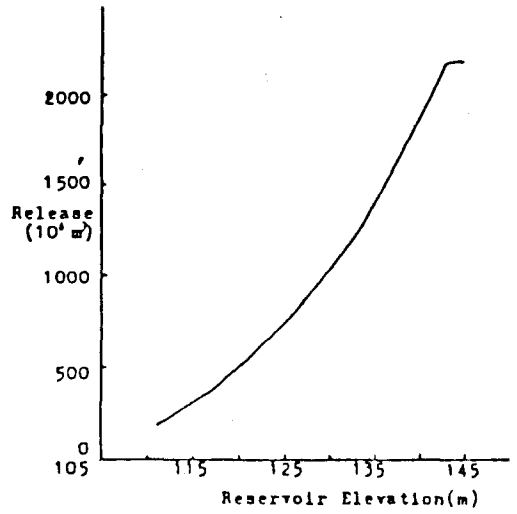


FIG. 3.2 STEADY-STATE RELEASE POLICY OF OCTOBER

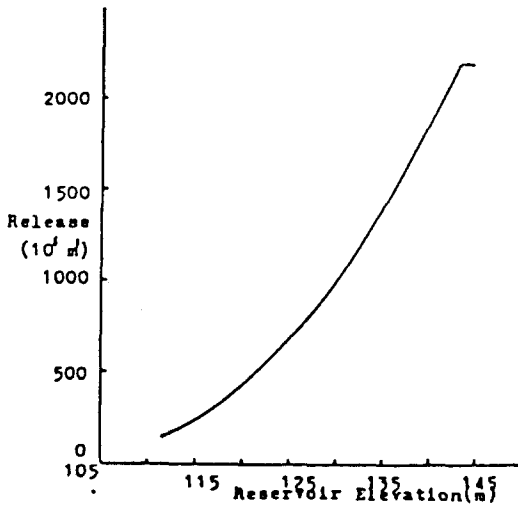


FIG. 4.1 STEADY-STATE RELEASE POLICY OF JUNE

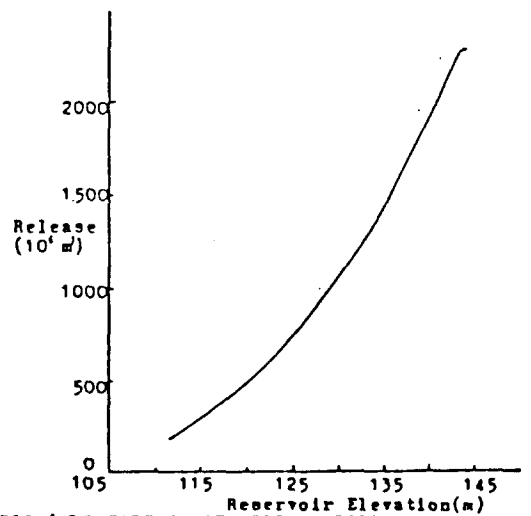


FIG. 4.2 STEADY-STATE RELEASE POLICY OF JULY

본 연구의 적용에서는 장기간의 실측자료로 부터 저수지의 이산 저류량 때 저수위, 이산 저류량 때 저류면적간의 관계식을 구하여 사용하였으며 감가상각률을 고려하지 않아 zero 값을 입력시켰고 방수로로 통한 방류는 없는 것으로 하였다.

여기서 방수로로 통한 방류량은 해당 저수지의 특성에 따라 저수지 방수로로 통한 방류량과 저수지 수위와의 관계식을 만들어야 하며 저수지의 일정 수위 이하에서는 방수로로 통한 방류는 하지 않는 것으로 하였다.

또한 활용수량의 방류 결정은 해당 목적함수에 대해서 장래의 용수 수요에 대한 공급량이 부족하지 않도록 고수위를 유지하고 매월의 방류 정책은 홍수기와 비홍수기로 구분하여 비홍수기에는 활용수량의 수위를 저수지 최대 수위까지 올려놓고 홍수기에는 홍수 규모에 따라 홍수 전용 용량을 확보하도록 하였다.

그리고 하절기의 저수지 표면 증발로 인한 과도한 손실량 문제를 고려했다.

## 5. 결 론

저수지 시스템의 최적운영을 위해 가장 중요한 것은 시스템의 다단계 현상을 정확히 반영하는 목적함수식의 개발이며 이에 따른 제약 조건들의 실시간 변동에 대한 적용이 대단히 중요하므로 본 연구에서는 이와 같은 상태를 비교적 잘 표현할수 있는 저수지 시스템의 최적운영 방법으로 steady-state stochastic Dynamic programming 기법을 사용하여 최적 방류량을 구할수 있는 방법을 제시하였다.

식(5)로 부터 steady-state 최적 방류량 결정을 하였으며 목적함수식(6)에서 전체 저수지 시스템 운영에 따른 총 비용을 계산 하였다.

그리므로 기간별로 저수지 상위에 따라 저수지 목적에 맞는 최적 방류량 결정과 이에 따른 비용을 구할수 있는 방법으로 우리나라 저수지 시스템에 적용한다면 그 최적 운영에 많은 개선이 이루어질 것으로 본다.