線型決定律에 의한 多目的댐의 運營律 考察

박명기[1], 고석구[2], 권오헌[3]

1. 서 론

線型決定律(Linear Decision Rule)에의한 저수지 운영률의 도출방안은 1969년 Revelle(1)에 의하여 처음 제안된 이래로 많은 연구가 있어왔다. 선형결정률은 저수지 운영에 관련한 많은 기존 최적화 모형중 평가함수의 선형화를 통한 해법의 단순화 및 신속성을 추구하는 기법으로서 평가함수의 선형계획법을 통한 해석으로 그 적용의 간편성이 강점이라고 할수 있다. 그러나 다목적댐의 운영중 비용배분에 따른 편익비중이 상대적으로 많은 수력발전 운영에 있어서, 발전함수가 가지는 비선형성 때문에 선형결정률에 관한 연구는 지체되어 왔다. 예외적으로 1969년 Louck와 1978년의 Houck 등(2)에 의한 연구가 있었지만, 본격적인 LDR 모형을 적용한 것은 아니었으며, 최초로 LDR모형이 수력발전에 사용된 연구는 1980년 Houck(3)의 연구에서였다. Houck(3)는 고전적인 1969년 Revelle 등(1)이 제시한 LDR 모형에 저수지 이용수심 구간내에서의 저수량과 유효낙차가 선형이라는 가정을 사용하여, 전체의 총이익과 총비용을 고려한 순이익을 최대화시키는 평가함수에 수력발전을 고려한 선형결정률의 적용을 제안한 바 있다. 그러나 이때의 평가함수는 1969년 Revelle(1)이 제안한 고전적 LDR의 기법이었으며, 이는 저수지의 동적특성을 기술하는데 무리함을 가지고 있다. 또한 저수지의 장기 운영시 반드시 고려해야할 저수지 증발효과를 반영시키지 못한 바 있다.

본 연구에서는 1974년 Revelle(4)에 의하여 제시된 다중선형 결정률의 방법에 증발효과가 고려된 선형결정률을 재구성하고, 수력발전함수를 선형적으로 취급할수 있도록 Houck(3)의 가정을 적용하여 수력에너지 생산을 최대화하는 평가모형을 설계하였다. 또한 본 이론의 실무 적용성을 높이기 위해, 현실적으로 저수지 운영시 가장 큰 인자로 작용하는 갈수대응개념의 빈도별 누가 유입량 개념을 사용한 계절별(월별) 확보수위 설정 방안과의 비교검토를 통한 실무적용성을 유도하였다.

---

1) 한국수자원공사 댐운영처
2) 한국수자원공사 댐운영처장, 공학박사
3) 충남대학교 교수, 공학박사, 수자원 기술사

2. 線型 決定律에 의한 貯水池 操作 이론

2.1 線型 決定律의 정의

1969년 Revelle등[1]에 의해 처음 제시된 **線型決定律** (Linear Decision Rule, 이하 LDR)은 식(1)과 같다.

$$A_t = S_{t-1} - E_i \tag{1}$$

이는 조작기간 t동안의 최적 방류량 A_t가 **前期間**(t-1) **終點**의 저류량 S_{t-1}과 계절특성치인 매개변수 E_i로 정의될수 있다는 것으로, 이때 i는 조작기간 t에 상응하는 반복적인 계절별 지수를 의미한다.

그러나 식(1)은 보통 월별로 나타내지는 연속된 유입량 계열이 서로 독립적(independent)으로 적용되어 모형의 적용에 의한 저수지 규모의 선정이나 이에 따른 저수지 운영효과가 과소하게 평가되는 단점을 가진다. 따라서 이에 따른 개선으로 식(1)의 우변항에 유입량 계열 특성을 추가하여 식(2)와 같은 Generalized LDR(GLDR)을 1975년 Revelle 등[5]이 제시하였다.

$$A_t = S_{t-1} + U_t \cdot Z_t + U_{t-1} \cdot Z_{t-1} \cdot \cdot \cdot \quad E_i \tag{2}$$

여기서 Z_t : 조작기간 t동안의 유입량, U_t : 계절별 유입량 가중치

한편 같은 해에 Louck 등은 같은 목적으로 식(3)과 같은 LDR의 수정형 (Modified LDR, MLDR)을 제안하였다.

$$A_t = S_{t-1} + (1 - \lambda) \cdot Z_t - E_i \quad 단,\ 0 < \lambda < 1 \tag{3}$$

이어서 1981년 Joeres 등은 AR-Model을 사용하여 본격적으로 추계학적 유입량 예측항을 첨가한 식(4)와 같은 형태의 Predictive LDR Model[6]을 제안하였다.

$$A_t = S_{t-1} + \zeta_t - E_i \tag{4}$$

여기서 ζ_t는 과거의 유입량 기록으로 부터 구성된 자기상관구조에 근거한 예측된 값으로서, 조작기간 t동안의 유입량을 말한다.

식(4)에서 ζ_t를 평균유입량 u_i로 삼을 경우,

$$A_t = S_{t-1} + E[\ \zeta_t\ ] - E_i = S_{t-1} - E_i* \tag{5}$$

단, E[ ]는 expectation

2.2 예측유입량 ζ_t의 산정 이론

다음과 같은 2변수 누가 확률분포 곡선에 대하여,

$$P\{ Z_t \le zt\ ;\ Z_{t-1} \le z_{t-1} \} = F(zt,\ z_{t-1}) \tag{6}$$

식(6)을 조건부 확률 개념을 도입해 정리하면, 적정 분포함수를 Φ, 평균을 μ, 표준편차를 σ, 상관계수를 ρ라 할때

$$P\{ Z_t \le zt\ \mid\ Z_{t-1} \le z_{t-1} \}$$
$$= \Phi\left[\frac{1}{1-\rho_t^{2^{1/2}}} \left(\frac{z_t - \mu_t}{\sigma_t} - \rho_t \frac{z_{t-1} - \mu_{t-1}}{\sigma_{t-1}} \right) \right] \tag{7}$$

식(7)은 平均이 $\mu_t + \rho_t \cdot (\sigma_t / \sigma_{t-1}) \cdot (z_{t-1} - \mu_{t-1})$, 표준편차가 $\sigma_t (1-\rho_t^2)^{1/2}$인 분포함수를 나타내며, 대상 분포의 확률변수 T_t를 사용하면 식(8) 및 식(9)로 일반화되어 진다.

$$Z_t = \mu_t + \rho_t \cdot (\sigma_t / \sigma_{t-1}) \cdot (Z_{t-1} - \mu_{t-1}) + T_t \cdot \sigma_t (1-\rho_t^2)^{1/2} \tag{8}$$

$$\text{단, } E[T_t] = 0,\ E[T_t^2] = 1,\ E[T_t \cdot Z_{t-\kappa}] = 0 \qquad \forall k \neq 0 \tag{9}$$

식(8)은 Thomas-Fiering의 단일지점에 대한 유량발생모형으로서 T_t에 따라 적정분포를 가지게 된다. 식(8)이 정규분포에 대해서 뿐아니라 다른 몇몇 분포형에 대해서도 적용가능하다는 것이 1967년 Fiering에 의해서 제안된 바 있다.

그리고 연속된 Z_t와 Z_{t-1}의 값들을 사용하여 **己知** 유입량 함수로 예측유입량 ζ_t를 구하면,

$$E[\ Z_t \mid Z_{t-1}\ ] = \zeta_t = \mu_t + \rho_t \cdot (\sigma_t / \sigma_{t-1}) \cdot (Z_{t-1}\ \mu - 1) \tag{10}$$

식(10)은 Thomas-Fiering Model에서의 확정론적 요소에 해당되며, ζ_t는 계절별 분포 매개변수에 의해 구해진다.

2.3 증발량을 고려한 수정 Predictive LDR

1970년 Revelle등[7]은 저수지의 증발량을 고려하는 LDR 모델을 Projected Storage개념을 사용하여 식(11)와 같이 제시한 바 있다.

$$A_t = SM_{t-1} - E_i \tag{11}$$

이때의 Projected Storage SM_{t-1}은 조작기간 t동안의 예상증발량이 미리 고려된 저류량을 말하며 다음과 같이 정의 되었다.

$$SM_{t-1} = S_{t-1}(1 - e^1 i) - e^{\circ} i \tag{12}$$

조작기간 t동안의 증발량은 식(13)의 형태로 정의되고,

$$\mathrm{evp_t} = \mathrm{e^0 i + e^1 i \cdot (S_t + S_{t-1})} \tag{13}$$

저수지의 연속방정식은 다음과 같다.

$$\mathrm{S_t = S_{t-1} + Z_t - A_t - evp_t} \tag{14}$$

새로운 Projected Storage SE_{t-1} 을 사용해 수정 LDR을 식(15)와 같이 정리하고, 이를 연속방정식에 대입하면,

$$\mathrm{A_t = SE_{t-1}} + \zeta_{\mathrm{t}} - \mathrm{E_i} \tag{15}$$

$$\mathrm{S_t = S_{t-1} + SE_{t-1} + Z_t} - \zeta_{\mathrm{t}} + \mathrm{E_i - evp_t} \tag{16}$$

식(16)에서 $\mathrm{evp_t \cong S_{t-1} - SE_{t-1}}$이고, 증발량 계산시에 사용할 예상 저류량 $S^p t$에 대해 $Z_t - \zeta_t$를 무시한다면, $S^p t \cong E_i$ 이다. 그러므로 수정 LDR은 다음과 같다.

$$A_t = S_{t-1}(1 - e^1 i) - e^0 i + \zeta_t - (1 + e^1 i) \cdot E_i \tag{17}$$

또한, $$S_t = (Z_t - \zeta_t)/(1 + e^1 i) + E_i \tag{18}$$

그리고 식(17)에서 저류량 항을 소거하면,

$$A_t = \{(1-e^1 i)/(1+e^1 i-1)\}(Z_{t-1}-\zeta_{t-1})-e^0 i+\zeta_t + (1-e^1 i)\cdot E_{i-1}-(1+e^1 i)\cdot E_i \tag{19}$$

3. 수력발전 최대화의 평가함수 설계

3.1 수력 발전함수

水力 에너지는 식(20)과 같이 표현된다.

$$P_t = C\cdot \eta \cdot W\cdot H_t \cdot A^{tur_t}\cdot \triangle t \tag{20}$$

여기서, P_t : t기간 중 생산되는 **水力**에너지 KWH
C : 단위 환산계수 η : 수차와 발전기의 합성 효율
W : 물의 단위중량 H_t : 발전기 유효낙차
A^{tur_t}: 발전 사용수량(방류량 A_t-직접취수량 A^{tak_t}-도수로방류량 A^{spi_t})
$\triangle t$: 발전시간

그리고 조작시간 t중의 수력 에너지의 기대치는 식(21)과 같이 표현되어 질 수 있다.

$$E[\ P_t] = C\cdot \eta \cdot W\cdot \triangle t\cdot E\ [\ Ht\cdot A^{tur_t}\ ] \tag{21}$$

식(21)의 우변을 선형화(linear approximation)하면,

$$E[\ H_t\cdot A^{tur}t\ ] = RTD_t\cdot E[\ H_t\ ] + RH_t\cdot E[\ A^{tur}t\ ] - RTD_t\cdot RH_t \tag{22}$$

여기서, RTD_t : t 기간중의 평균 사용수량 RH_t : t 기간중의 평균 유효낙차

3.2 目的函數 設計

3.2.1 새로운 確率變數의 도입

전개될 수식에 맞게 새로운 **確率變數** $R1_t$ $R2_t$를 다음과 같이 정의하자.

$$R1_t = (Z_t-\zeta_t)/(1+e^1 i) \tag{23}$$

$$R2_t = (1-e^1 i+1)\cdot(Z_t-\zeta_t)/(1+e^1 i)+\zeta_{t+1} \tag{24}$$

그러면 앞서 전개한 식(18),식(19)는 다음과 같다.

$$S_t = R1_t + E_i \tag{25}$$

$$A_t = R2_{t-1} + e^0\ i + EC1_i\cdot E_{i-1} - EC2_i\cdot E_i \tag{26}$$

$$단,\quad EC1_i = 1-e^1 i,\qquad EC2_i = 1+e^1 i \tag{27}$$

3.2.2 目的函數 전개

식(21)의 최대화를 위해 목적함수를 정리하면,

$$\text{Maximize} \quad HE = \Sigma E[\ H_t \cdot A^{tur}{}_t]$$

$$= \Sigma \{RTD_t \cdot E[\ H_t] + RH_t \cdot E[\ A^{tur}{}_t] - RTD_t \cdot RH_t\} \qquad (28)$$

일반적으로 貯水池의 貯水池의 幾何學的 특성에 따라 決定될 상수 C0, C1에 의해 利用水深區間에서는 조작 기간 t동안의 유효낙차를 다음과 같이 線型式으로 간주 할 수 있다.

$$H_t = C0 + 0.5\ C1 \cdot (S_{t-1} + S_t) \qquad (29)$$

$$E[\ H_t] \quad = \quad C0 + 0.5\ C1(E_{i-1} + E_i)$$

$$E[\ A^{tur}{}_t] \ = \mu_{zt} + e^0 i + EC1_i E_{i-1} - EC2_i E_i - A^{di}{}_t - A^{spi}{}_t \qquad (30)$$

3.3 制約條件 設定

본 研究에서 사용될 制約條件은 식(14)에 기술된 貯水池 연속 방정식과 發電基 특성에 따른 제약 조건 및 저수지 제약 조건이 있다.

3.3.1 發電機 特性에 따른 制約條件

操作期間別 發電基 最大 有效 使用水量을 TD_t라 할경우 發電基 使用水量의 기대치인 $A^{tur}{}_t$는 다음의 條件을 만족시켜야 한다.

$$A^{tur}{}_t = A_t - A^{spi}{}_t - A^{tak}{}_t \le TD_t \qquad (31)$$

3.3.2 最小 저류량 制約

線型 決定律에서의 A_t가 陰數를 나타내지 않을 상태 (B_t)에서, t期間의 저류량 S_t가 最小 하한치인 m_i보다 크게 유지될 信賴度를 $P_t{}^m$으로 할 때, 이는 아래 (32)식의 간단한 條件附 確率식으로 표현된다.

$$P_t{}^m \le P\{S_t \ge m_i \mid B_t\} \qquad (32)$$

$$\therefore P_t{}^m \le P\{Rl_t \ge m_i - E_i\}$$

$$E_i \ge m_i - F_{Rli}{}^{-1}(1 - P_i{}^m) \qquad (33)$$

3.3.3 最大 저류량 制約

$$P_t{}^v \le P\{S_t \le V_i \mid B_t\} \qquad (34)$$

그리고 $\quad \therefore E_i \le V_i - F_{Rli}{}^{-1}(P_i{}^v) \qquad (35)$

3.3.4 **最小 放流量 制約**

$$P\{S_t \geq S_t^*\} \geq P_{t+1}^{\,q} \tag{36}$$

$$S_t^* = \{q_{i+1} + EC2_{i+1} \cdot E_{i+1} + e_{i+1}^{\,0} - \zeta_{t+1}\}/EC1_{i+1} \tag{37}$$

정리하면

$$\therefore EC2_{i+1} \cdot E_{i+1} - EC1_{i+1} \cdot E_i \geq q_{i+1} + e_{i+1}^{\,0} - F_{R2i}^{-1}(1-P_{i+1}) \tag{38}$$

4. 결 론

본 연구에서는 선형결정률의 유입량 적용성을 향상시키기 위하여 수정 Predictive LDR 기법을 도입하였고, 저수지의 월단위 증발량을 고려한 새로운 선형결정률의 운영형태를 제안하였다. 또한 본 운영률을 용수공급적정선인 월별 용수공급확보수위와 병행하여 운용하는 경우 실무적용성을 보다 높일 수 있을 것이다.

본 이론은 단일댐 및 복합댐에 대하여 적용할수 있으며, 다목적댐의 운영률 결정에 보다 간편한 이론을 제공해 줄수 있으리라 판단된다.

참 고 문 헌

1. C. REVELLE, E. JOERES & W. KIRBY(1969.8), "The Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design 1, Development of the Stochastic Model", W.R.Research,5(4),767-777.
2. M.H.HOUCK(1978.4), "Sequential Explicitly Stochastic Linear Programing Models: A Proposed Method for Design and Management of Multipurpose Reservoir Systems", W.R. Research,14(2), 161-169.
3. M.H.HOUCK(1980.2), "Linear Decision Rule in Reservoir Design and Management 6. Incorporation of Economic Efficiency Benefits and Hydroelectric Energy Generation", W.R.Research,16(1), 196-200.
4. C. REVELLE & J. GUNDELACH(1975.4), "Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design 4. A Rule That Minimizes Output Variance", W.R.Research,11(2), 197-203.
5. J. GUNDELACH & C. REVELLE(1975.4), "Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design 5. A General Algorithm", W.R.Research,11(2), 204-207.
6. E.F.JOERES ET.AL(1981.2), "The Linear Decision Rule Reservoir Problem With Corelated Inflows 1. Model Development", W.R.Research,17(1), 18-24.
7. C.REVELLE & W.KIRBY(1970.8), "Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design 2. Performance Optimization", W.R.Research,6(4), 1033-1044.