

기존 농업용 저수지에서의 유효저수량의 평가

Evaluation of the Effective Storage of Existing Agricultural Reservoir

안 태 진* / 조 동 호** / 이 상 호*** / 최 계 운**** / 윤 용 남*****

Ahn, Taejin/Cho, Dong Ho/Lee, Sang Ho/Choi Gye Woon /Yoon, Yong Nam

Abstract

Effective storage in agricultural reservoir has been determined through the reservoir simulation operation based on the water budget analysis. Since each watershed has the native property for runoff, considering the runoff yielding from the basin is feasible to the determination of reservoir effective storage. In this study the stochastic linear programming model considering mainly runoff from watershed has been also formulated to analyze the effective storage of the exiting reservoir. The linear decision rule coupled with chance-constrained model in the linear programming model contributes to reduce the size of linear program model without considering the period of analysis. The Geum-Gang reservoir located in Ansong have been adopted to evaluate the effective storage. It has been shown that the effective storage based on the linear programming model is greater than that based on the water budget analysis. It has been also desired that once the effective storage is obtained through the linear programming model, operation of the reservoir should be performed to check the designed capacity.

Keywords : effective storage, water budget analysis, linear decision rule, stochastic linear programming model

요 지

농업용 저수지의 유효저수량은 물수지 분석을 근거로 한 저수지 모의 운영을 통하여 결정하고 있다. 유역은 유출량에 관하여 고유한 특성을 갖고 있으므로 저수지에서 유효저수량의 결정은 유역으로부터의 유출량을 근거로 하는 것이 타당하다. 본 연구에서는 유역의 유출량을 근거로 한 추계학적 선형계획모형을 정립하고 저수지의 유효저수량을 분석하였다. 선형계획모형을 이용한 저수지 분석에 있어서 선형결정법칙은 Chance-constrained model과 함께 분석년수와 관계없이 제약조건식을 줄이는데 기여한다. 경기도 안성시에 소재하고 있는 금광저수지를 대상저수지로 선정하여 유효저수량을 분석한 결과, 추계학적 선형계획모형에 의한 유효저수량은 물수지 분석에 의한 것 보다 크게 분석되었다. 본 연구에서 제시된 선형계획모형에 의하여 적정한 유효저수량을 결정하고, 저수지 모의운영을 통하여 결정된 유효저수량의 성능을 평가하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 유효저수량, 물수지 분석, 선형결정법칙, 추계학적 선형계획모형

* 한경대학교 토목공학과 부교수
Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Hankyong National Univ., Ansong, Kyonggi 456-749, Korea
(E-mail : ahntj@hnu.hankyong.ac.kr)

** 남원건설엔지니어링 수자원부
Former Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Hankyong National Univ., Ansong, Kyonggi 456-749, Korea

*** 부경대학교 토목공학과 부교수
Associate Prof., Division of Construction Engrg., Pukyong Univ., Busan 608-739, Korea

**** 인천대학교 토목환경시스템공학과 부교수
Associate Prof., Dept. of Civil & Envir. System Engrg., Univ. of Incheon, Incheon 402-749, Korea

***** 고려대학교 토목환경공학과 교수
Prof., Dept. of Civil and Envir. Engrg., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

1. 서론

농업용 저수지에서 유효저수량의 증대에 의한 용수 공급 능력의 제고는 지역 수자원 관리를 통하여 대규모 다목적 댐의 용수 공급 스트레스를 완화시키고 지역 환경 보전 및 안정적인 지역 용수 공급에 기여한다. 따라서 농업용 저수지의 수요 및 공급 양상의 파악, 기존 저수지 유효저수량을 분석하고 용수공급 능력을 평가하여 적절한 저수지 규모를 제시할 필요가 있다. 그동안 농업용 댐의 개선방안으로 유지관리 및 물관리 측면에서의 문제점을 도출하고 회귀수 이용, 관개방법 개선 등에 의한 용수 절감 및 용수공급 능력의 제고 방안이 제시되었다. 하천유지유량 및 수해 저감을 위한 기존 농업용댐 재개발의 필요성 및 당위성이 제기되었으며, 휴경지의 증가와 같은 농림정책 또는 작부체계 변화와 같은 영농변화에 의한 농업용수의 절감 방안이 제시된 바 있다. 또한 기존 농업용 댐의 용수공급능력의 제고를 위해서는 상하류에 다단계 보를 설치 운영하는 방안이 제시되었으며, 이를 통하여 제고된 용수공급 능력의 활용을 위하여 지역수자원 수급계획의 수립이 필요한 것으로 제기되었다(과학기술부, 2003a 및 2003b).

일반적으로 농업용 저수지는 농업용수를 공급하는 단일 목적으로 설치되어 홍수조절용량이 부족한 실정이다. 2002년에 발생한 태풍 루사에 의한 농업용 저수지의 피해를 계기로 하여, 정부는 기존 농업용 저수지의 재개발을 2003년부터 적극적으로 추진하고 있다(수해방지대책기획단, 2003). 기존 농업용 댐의 재개발 추진 방향은 저수지로부터의 용수공급 및 홍수조절 능력을 제고하는 것이다. 기존 댐 재개발 사업과는 별개로 수문, 고무보 등을 통한 자유 물넘이식 여수로의 구조개선을 통하여 기존 저수지의 유효저수량을 증대할 수 있다. 저수지의 홍수조절능력은 주로 여수로의 계획빈도에 따라 결정되지만 저수지의 유효저수량은 수요량 및 공급량에 따라 결정된다.

농업용저수지의 유효저수량은 일반적으로 경지면적을 먼저 결정하여 수요량을 산정한 후, 저수지 모의 운영의 결과에 의하여 결정하고 있다(농림부, 1989, 2002). 안승섭 등(1997)은 tank모형으로 월유출량을 추정하고 누가곡선법과 추계학적방법 중에서 TPM모형을 이용하여 농업용 저수지의 용수공급능력을 평가하였다. Revelle 등(1969)은 저수지 규모 결정을 위하여 선형결정법칙(linear decision rule)을 도입하였으며, 그 후 많은 학자들에 의하여 최적화모형에 의한 저수지 관리 및 설계에 관한 연구가 수행되어 왔다. Loucks 등(1975)은 저수지 운영을 위하여 추계학적 최적화모형에서 선형결

정법칙을 평가하였으며, Yeh (1985)는 저수지 관리 및 운영에 관한 각종 수학적모형을 상술하였다. 또한 선형 결정법칙을 변형한 다양한 저수지운영 결정법칙이 많은 학자들에 의하여 제안되어 저수지 규모 결정과 운영지침에 이용하고 있어 수문인자의 계절성과 불확실성을 극복하고 있다.

유역은 유출량에 관하여 고유한 특성을 갖고 있으므로 저수지 유효저수량의 결정은 유역으로부터의 유출량을 근거로 하는 것이 타당하다. 본 연구에서는 경기도 안성시에 소재하고 있는 금광저수지의 유효저수량을 물수지 분석을 근거로 한 저수지 모의 운영을 통하여 평가하였다. 물수지 분석에서 유역의 유출량 산정은 가지야마공식 및 Tank 모형을 적용하였고, 농업용수 수요량은 Blaney-Criddle식 및 Penman 공식을 적용하였다. 또한 물수지 분석으로부터 유역의 유출량을 근거로 한 추계학적 선형계획모형을 정립하고, 모형해석을 통하여 적절한 저수지의 이수용량의 규모를 제시하였다.

2. 유효저수량 결정 모형

2.1 물수지분석

물수지 분석은 결정된 수리 시설물에서 유입량, 유출량, 손실량 등에 의한 시설물의 거동을 모의함으로써 시설물의 성능(performance)을 사전에 파악할 수 있으며 예상되는 문제점도 도출해 낼 수 있다. 이와 같은 물수지 분석 방법을 저수지 모의운영분석이라 하며, 저수지의 유효저수량을 결정하는데 이용된다. 물수지 분석은 식 (1)과 같은 저수지 연속방정식을 근거로 하고 있다.

$$S_{t+1} = S_t + I_t - O_t - E_t - L_t, \quad 0 < S_{t+1} < C \quad (1)$$

여기서, S_{t+1} 은 단위기간 시점의 저류량, S_t 는 단위기간 종점의 저류량, I_t 는 저수지내 유입량, O_t 는 방류량, E_t 는 저수면 증발량, L_t 는 기타 손실량 그리고 C 는 유효저수량이다.

본 연구에서 저수지내 유입량은 저수지 모의운영 프로그램인 HOMWRS(농업기반공사, 2000)에 포함된 가지야마(Kajiyama)의 유출고 공식 및 수정 탱크(Tank)모형을 이용하여 추정하였다. 수정 탱크모형에서 1단 탱크는 유출의 성분중 지표유출을 개념화한 것이고 2단 및 3단은 각각 중간유출 및 기저유출을 개념화한 것이다. 관개용수의 산정에 있어서 잠재 증발산량은 Blaney-Criddle식과 FAO의 수정 Penman식으로 산정하고 작물계수를 감안하여 작물의 소비수량을 계산한다. 산정된

소비수량에 답에서의 침투량, 저수지 수면으로부터의 증발량, 수로손실 및 관리손실을 반영하여 작물의 필요 수량을 계산한다. 또한 답에서의 유효수량, 저수지 유역으로부터 유입되는 유수량에 의한 퇴적량을 고려한다.

단순 물수지는 저수지로의 일단위 또는 순단위의 유입총량과 유출총량을 단순 비교하는 물수지 분석기법이다. 단순물수지의 경우 초기 만수위를 가정하고 수 십 개년 동안 연속하여 저수량의 변화를 추적하여 매년의 가장 낮은 저수량일 때에 만수가 되기 위해 필요한 저수량을 저수지의 연도별 필요수량으로 한다. 이와 같이 연속하여 물수지를 계산하게 되면 저수지의 저수량 및 저수위의 변화를 살펴볼 수 있게 되며 매년의 필요저수량을 년 최대치 계열로 하여 빈도해석을 적용함으로써 설계 유효저수량을 결정하게 된다.

2.2 추계학적 선형계획 모형

선형계획(linear programming) 모형에 저수지 분석을 용이하게 하는 선형결정법칙(linear decision rule)은 Revelle(1969)가 처음으로 제안한 이후로 많은 연구자들에 의하여 개선되었으며 저수지설계와 운영관리 문제를 해석하는데 크게 기여하였다. 선형계획 이론에 의거 저수지의 필요저수량을 결정하기 위하여 공식화한 확정론적 모형은 모형 1과 같다.

모형 1:

목적함수 : Minimize c

제약조건

$$\text{(Subject to): } S_t = S_{t-1} + r_t - x_t \quad (2a)$$

$$c \geq S_t \quad (2b)$$

$$S_t \geq S_{\min} \quad (2c)$$

$$x_t \geq q_i \quad (2d)$$

$$x_t \leq f_i \quad (2e)$$

여기서 q_i : 연중 i 순의 최소방류량

f_i : 연중 i 순의 최대방류량

c : 저수지 유효저수량

S_{\min} : 최소저수량 ($a_m \cdot c$)

s_0 : 초기저수량 ($a_0 \cdot c$)

r_t : 분석 기간 중 t 순의 호내 유입량 또는 유역으로부터의 유출량

x_t : 분석 기간 중 t 순의 방류량 또는 필요수량

s_t : 분석 기간 중 t 순의 저수량

위의 선형계획 모형을 살펴보면 식 (2a)는 저수지내 연속성 제약조건(continuity constraint)으로써 t 순(旬)말의 저수량 s_t 는 $t-1$ 순말의 저수량 s_{t-1} 에 t 순의 저수지내 유입량 r_t 를 합한 것에 t 순의 방류량 x_t 를 뺀 것과 같다. 식 (2b)는 유효저수량 제약조건(effective storage constraint)으로써 t 순말의 S_t 는 유효저수량보다 작거나 같아야 한다. 식 (2c)는 최소저수량 제약조건(minimum storage constraint)으로써 t 순말의 저수량 s_t 는 최소저수량 s_{\min} 보다 크거나 같아야 한다. a_m 과 a_0 는 소수으로써 각각 최소저수량과 초기저수량을 저수지 유효저수량의 크기로 표시하였다. 식 (2d)는 방류량 제약조건(release constraint)으로써 t 순의 방류량 x_t 는 최소방류량 q_i 보다 크거나 같아야 한다. 식 (2e)는 최대허용방류량 제약조건(maximum allowable release constraint)으로써 t 순의 방류량 x_t 는 최대방류량 보다 작거나 같아야 한다. 따라서 본 모형은 식 (2a)~(2e)의 제약조건이 구성하는 분석가능영역(feasible region)에서 목적함수인 저수지의 유효저수량 c 를 최소화하는 것이다.

분석기간이 36년이라 한다면 순단위 제약조건식에서 각 조건식의 t 는 1, 2, ..., 1,296으로써 총 6,480개의 방정식이 되므로 선형결정법칙(linear decision rule)을 적용하여 제약조건 방정식의 갯수를 줄이고자 하였다. 선형결정법칙은 식 (a)와 같으며 b_i 는 연중 i 순의 선형결정법칙의 매개변수이다. $x_t = s_{t-1} - b_i$ (a) 저수지에서 연속방정식은 $s_t = s_{t-1} + r_t - x_t$ 이므로 식 (a)을 대입하여 정리하면 $s_t = s_{t-1} + r_t - s_{t-1} + b_i$, $s_t = r_t + b_i$(b), $s_{t-1} = r_{t-1} + b_{i-1}$(c)가 된다. 또한 식 (c)를 식 (a)에 대입하면 $x_t = r_{t-1} + b_{i-1} - b_i$(d)가 된다. 따라서 모형 1의 식(2b) ~ 식(2e)에 식(b)와 식(d)를 대입하면 다음과 같은 모형 2로 된다.

모형 2: Min. c

$$\text{s. t. } c - b_i \geq r_t \quad (3a)$$

$$r_t + b_i \geq S_{\min} \quad (3b)$$

$$r_{t-1} + b_{i-1} - b_i \geq q_i \quad (3c)$$

$$r_{t-1} + b_{i-1} - b_i \leq f_i \quad (3d)$$

$s_{\min} = a_m \cdot c$, $s_0 = a_0 \cdot c$ 라 하고 확정론적 선형모형으로 정리하면 다음 모형 3과 같이 된다.

모형 3: Min. c

s. t.

$$c - b_i \geq \max_n (r_{i+36n}), \quad i = 1, 2, \dots, 36 \quad (4a)$$

$$a_m c - b_i \leq \min_n (r_{i+36n}), \quad i = 1, 2, \dots, 36 \quad (4b)$$

$$a_0 c - b_1 \geq q_1 \quad (4c)$$

$$q_1 - b_{36} + b_1 \leq \min_n (r_{36+36n})$$

$$q_i - b_{i-1} + b_i \leq \min_n (r_{i-1+36n}),$$

$$i = 2, 3, \dots, 36$$

$$a_0 c - b_1 \leq f_1 \quad (4d)$$

$$f_1 - b_{36} + b_1 \geq \max_n (r_{36+36n})$$

$$f_i - b_{i-1} + b_i \geq \max_n (r_{i-1+36n}),$$

$$i = 2, 3, \dots, 36$$

여기서, n은 분석년수이며 i는 t가 1, 2, ..., 36까지는 t와 같고 t가 37이상일 때는 36으로 나눈 나머지와 같다. 예를 들어 t=6이면 i도 6이고, t가 37이면 i는 1이다.

$\max_n (r_{i+36n})$ 는 분석 기간 동안 순별 최대유입량이고, $\min_n (r_{i+36n})$ 은 순별 최소유입량을 의미한다. 위 모형에서 보는 바와 같이 제약조건 방정식의 개수는 146로 되었으며 모든 식의 우변은 호내 유입량으로 산정할 수 있다. 확정론적 선형모형에서 사용된 유입량은 확률개념이 포함되지 않아 저수지의 신뢰성(Reservoir's reliability)에 관한 언급이 없으므로 순별유입량을 확률변수(random variable)로 처리하여 추계학적 선형계획모형으로 변환하기로 한다.

추계학적 모형에서 유입량을 확률변수로 취급하기 위하여 제약조건식을 Chance-constraint 개념을 도입하였다. 예를 들어 식 (4a)를 Chance-constraint로 표현하면 다음과 같다. $c - b_i \geq r_i(\alpha_1)$, 여기서 $r_i(\alpha_1)$ 은 유입량 r_i 의 확률이다. 1월 상순, 즉 i=1인 경우를 살펴본다. 유입량(r_i)은 평균(μ_i)과 분산(σ_i^2)을 갖고 정규분포 한다고 하고 Chance - constraint를 다시 쓰면

$p[r_1 \leq c - b_1] \geq \alpha_1$ 이 된다. 표준정규분포확률분포도에서 $c - b_1 = z$, α_1 의 확률을 0.9라 하면 $z \geq r_1^{0.9}$ 일 경우에 $p[r_1 \leq z] \geq 0.9$ 를 만족한다. Chance-constraints에서 최대유입량은 초과확률 10%인 유입량($r_i^{0.9}$)으로 하고 최소유입량은 초과확률 90%인 유입량($r_i^{0.1}$)으로 한다. 최소방류량은 초과확률 90%인 필요수량($q_i^{0.1}$)으로 한다. 이를 이용하여 확정론적 모형을 추계학적 모형으로 변경하면 다음과 같다. 초과확률에 대한 유입량은 설계기준에 따라 결정할 수 있다.

모형 4: min c

$$s. t. \quad c - b_i \geq r_i^{0.9}, \quad (i = 1, 2, \dots, 36) \quad (5a)$$

$$a_m c - b_i \leq r_i^{0.1}, \quad (i = 1, 2, \dots, 36) \quad (5b)$$

$$a_0 c - b_1 \geq q_1^{0.1} \quad (5c)$$

$$q_1^{0.1} - b_{36} + b_1 \leq r_{36}^{0.1}$$

$$q_i^{0.1} - b_{i-1} + b_i \leq r_{i-1}^{0.1}, \quad (i = 2, 3, \dots, 36)$$

$$a_0 c - b_1 \leq f_1 \quad (5d)$$

$$f_1 - b_{36} + b_1 \geq r_{36}^{0.9}$$

$$f_i - b_{i-1} + b_i \geq r_{i-1}^{0.9}, \quad (i = 2, 3, \dots, 36)$$

식 (5a)~식 (5d)의 제약조건식으로 구성된 모형을 선형계획 전산 프로그램으로 해석하기 위해서는 b_i 에 대해 추가정의가 필요하다. 즉 b_i 값이 음수 또는 양수일 경우를 대비하여 $b_i = h_i - g_i$ 로 한다. 모형 5는 매순 90%의 신뢰성을 갖는 최대 및 최소 유입량, 최소 저수량, 등의 요구조건에 충족하는 저수지의 최소소요용량을 결정하는 것이며 수학적인 모형은 다음과 같다.

모형 5: Min c

s. t.

$$c + g_i - h_i \geq r_i^{0.9}, \quad i=1, 2, \dots, 36 \quad (6a)$$

$$a_m c + g_i - h_i \leq r_i^{0.1}, \quad i=1, 2, \dots, 36 \quad (6b)$$

$$a_0 c + g_1 - h_1 \geq q_1^{0.1} \quad (6c)$$

$$g_1 - h_1 - g_{36} + h_{36} \geq q_1^{0.1} - r_{36}^{0.1}$$

$$g_i - h_i - g_{i-1} + h_{i-1} \geq q_i^{0.1} - r_{i-1}^{0.1}, \quad i=2, 3, \dots, 36$$

$$c + g_1 - h_1 \leq f_1 \quad (6d)$$

$$g_1 - h_1 - g_{36} + h_{36} \leq f_1 - r_{36}^{0.9}$$

$$g_i - h_i - g_{i-1} + h_{i-1} \leq f_i - r_{i-1}^{0.9}, \quad i=2, 3, \dots, 36$$

3. 기존 저수지의 유효저수량 평가

3.1 대상저수지

대상저수지로 선정된 금광저수지는 경기도 안성시 일원에 소재하고 있고 농업용수 공급을 목적으로 1961년에 준공되었다. 금광저수지의 유역면적은 48.3km²이고 유효저수량은 10.55×106m³이며 2000년 기준으로 관

개면적은 1,885ha (1961년 : 2,134ha)로서 농업용저수지로는 대규모 댐이라 할 수 있다(표 1 및 그림 1 참조). 1999년에 여수로 구조개선사업으로 높이가 7m이고 폭이 6m인 수문 4련을 설치하였다. 관리수위는 68.0 EL. m이며 홍수위는 69.5 EL. m이다. 금광저수지의 취수탑으로 방류되는 용수는 농업용수로 이용되고, 우기시 수문을 통하여 유출되는 과잉수는 안성천으로 유입되어 평택호로 유입된다.

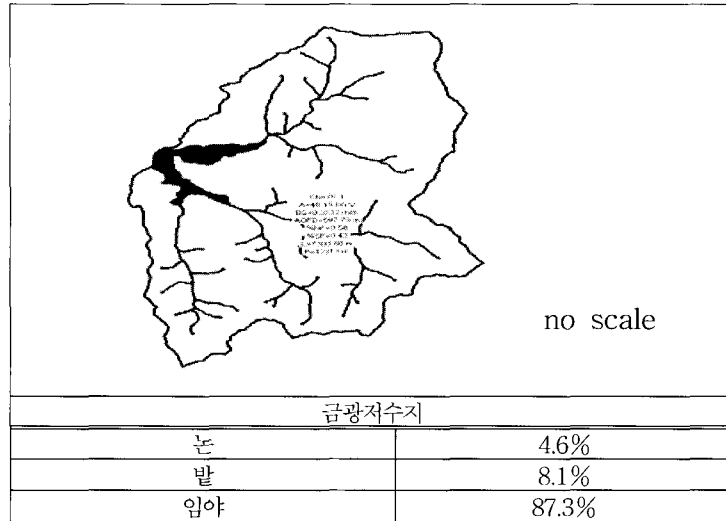


그림 1. 금광저수지 유역도

표 1. 금광저수지 내역

저수지 명 (소재지)	관개 면적 ha	관개 면적**ha	감소 관개 면적	담의 삼투량 mm/일	계획 저수량 (천m ³)			유역 면적 ha	만수 면적 ha	제 당	
					총 저수량	사수량	유효 저수량			연장 m	최대고 m
금광 (안성)*	2,134	1,885	249	4.0	10,590	40	10,550	4,830	152	225	21

사수위 El. m	관리 수위 El. m	홍수위 El. m	여수로 월류 수심 m	최대홍수량 /(보강선) m ³ /s	취수 형식	준공 연도	여수로 형식
53.0	68.0	69.5	1.5	741.9/477	취수탑	'61	수문7×6.2×4련

* 여수로 구조개선 ** 2002년

3.2 물수지 분석에 의한 유효저수량

저수지 모의 운영은 HOMWRS(농업기반공사, 2000)을 적용하였으며 주요 입력자료는 표 1 및 표 2와 같다. HOMWRS 프로그램은 다음 두가지 경우로 저수지의 유효저수량을 산정할 수 있다. 첫 번째는 가지야마공식으로 순별 유출량을 Blaney-Criddle 공식으로 작물의

소비수량을 산정하고, 두 번째는 Tank모형으로 일별 유출량을 Penman 공식으로 일별 소비수량을 산정한다. 본 분석에서는 가지야마공식의 유역계수는 1.0을 적용하였으며, 산정된 필요저수량은 표 2와 같다. 표 3은 저수지 물수지 분석 결과를 나타내었으며, 잠재증발산량은 수위기상대에서 1967년부터 2002년까지의 기상자료를 이용하여 산정하였다.

표 2. 저수지 필요저수량 산정 결과

지역명	구분	관개 면적 (ha)	필요저수량 (천m ³)	유출량 및 소비수량 산정	산정 방법	관개 빈도 (년)	작물 분포	작부 체계	비고
금광	계획당시 (1961년)	2,134	9,203	가지야마 공식 (Blaney-Criddle)	4.0	10	Gumbel	재래종 100%	(현) 유효저수량 10,550천m ³
			10,196	Tank모형 (Penman)					
	2002년	1,885	8,016	가지야마 공식 (Blaney-Criddle)					
			8,838	Tank모형 (Penman)					

표 3. 금광저수지 물수지 분석결과 요약(단위 : 천m³)

지역명	공식	평균	관개 면적			관개 빈도			관개 수		
			관개 면적	관개 수	관개 수	관개 수	관개 수	관개 수	관개 수	관개 수	관개 수
금광	가지야마 공식 및 Blaney - Criddle 공식	평균	37351.0	11605.1	25745.9	5206.4	.0	64.08	5314.7	25745.9	
		최대	65567.7	15775.3	57790.2	8581.3	.0	67.30	8827.6	57790.2	
		최소	24210.9	6618.3	10984.4	1693.6	.0	60.05	1939.9	11675.8	
	Tank모형 및 Penman 공식	평균	44324.7	13400.8	30923.9	5830.1	21.0	62.94	4712.1	30944.9	
		최대	76691.8	18645.8	68212.0	11256.4	756.3	66.34	8202.9	68212.0	
		최소	27201.3	7702.1	9834.6	2318.3	.0	53.00	21.0	12310.4	

표 2와 같이 금광저수지에 관하여 계획당시의 관개 면적 및 삼투량을 적용하고 작부체계는 재래종을 100% 재배하는 것으로 한 결과, 물수지분석에 의한 필요저수량은 기존 유효저수량과 약간의 차이를 나타내어 양호한 결과로 분석되었다.

그러나 표 2와 같이 2002년 기준으로 관개면적 및 작부체계 그리고 가지야마 공식 및 Blaney-Criddle 공식에 의하여 평가되는 금광저수지의 필요저수량은 각각 8,016천m³이고, Tank모형 및 Penman 공식에 의한 필요저수량은 8,838천m³로 금광저수지 기존 유효저수량보다 적게 평가되었다. 한편 2002년 관개면적 적용시, 금광저수지에서 가지야마 공식 및 Blaney-Criddle 공식에 의한 저수지 모의운영 결과에 의하면 1967년부터 2002년까지의 분석기간내 물부족 현상이 발생하지 않으나, tank모형 및 Penman 공식에 의한 결과와 같이 유효저수량이 8,838천m³이라면 1982년에 물부족 현상이 발생하는 것으로 분석되었다(표 3 참조). 이는 가지야마 공식 및 Blaney-Criddle 공식에 의한 저수지 모의운영에서는 순별로 유출량, 소비수량 등이 산정되고, tank모형 및 Penman 공식에 의한 모의운영은 일별로 산정되

기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 선형계획모형에 의한 유효저수량 평가

2.2절의 모형 5는 선형계획 전산프로그램인 LINDO 나 IMSL 등으로 분석할 수 있다. 초과확률 유입량은 저수지 모의운영 해석에서 산정된 순별 유출량을 이용하였다. 즉, 1967년부터 2002년까지의 순(旬)별유출량은 plotting position 확률개념을 적용하여 분석기간내 특정 순인 i순의 확률로 결정하였다. 모형 5와 같이 최대유입량은 초과확률 10%인 유입량($r_i^{0.9}$)으로 하고 최소유입량은 초과확률 90%인 유입량($r_i^{0.1}$)으로 하였다. 최소 방류량은 초과확률 90%인 필요수량($q_i^{0.1}$)으로 한다. 표 4에는 추계학적 선형계획모형에서 금광저수지에 적용된 초과확률 유출량 및 초과확률 필요수량을 나타내었으며, 최소저수량은 유효저수량의 10%로 하였고 초기저수량은 유효저수량의 60%로 하였다.

표 4. 금광저수지에서의 유입량 및 필요수량

(단위: 천m³)

월	순	가지야마 공식 및 Blaney-Criddle 공식			tank 모형 및 Penman 공식		
		초과확률 10% 유입량, r ^{0.5}	초과확률 90% 유입량, r ^{0.1}	초과확률 90% 필요수량, q ^{0.1}	초과확률 10% 유입량, r ^{0.9}	초과확률 90% 유입량, r ^{0.1}	초과확률 90% 필요수량, q ^{0.1}
1	상	421.0	124.0	0.0	678.4	68.2	0.0
	중	263.9	124.0	0.0	442.3	70.6	0.0
	하	584.3	124.0	0.0	773.9	90.5	0.0
2	상	216.6	124.0	0.0	529.0	66.6	0.0
	중	516.3	124.0	0.0	844.8	57.4	0.0
	하	495.7	124.0	0.0	879.3	44.8	0.0
3	상	610.5	164.2	0.0	1024.9	43.3	0.0
	중	549.8	164.2	0.0	675.3	40.2	0.0
	하	759.5	164.2	0.0	1054.3	60.6	0.0
4	상	1224.7	244.7	0.0	1705.5	41.2	0.0
	중	1197.3	244.7	139.2	1711.0	36.4	139.2
	하	2012.0	244.7	5.8	1927.7	70.0	9.8
5	상	1612.6	164.2	0.3	2479.3	49.5	0.1
	중	2384.3	164.2	6.3	2906.6	68.9	6.6
	하	1151.1	164.2	8.6	2244.3	36.8	30.6
6	상	1271.3	132.0	607.0	2023.2	27.0	811.0
	중	1544.6	132.0	345.5	1976.9	124.7	294.8
	하	3578.5	132.0	228.1	3824.7	108.3	54.1
7	상	7071.9	164.2	55.0	7246.6	67.1	110.8
	중	5967.1	164.2	17.6	6825.5	234.0	15.8
	하	11334.9	164.2	29.2	10850.1	183.9	244.0
8	상	9749.4	164.2	4.6	9587.1	305.1	32.1
	중	8195.8	164.2	89.9	8026.5	237.3	13.5
	하	8357.9	164.2	122.3	10959.9	193.3	23.8
9	상	3725.0	260.8	4.4	5824.9	312.4	25.0
	중	4708.5	260.8	0.0	4569.2	181.7	0.0
	하	1682.8	260.8	0.0	1739.2	148.1	0.0
10	상	659.9	276.9	0.0	1598.0	142.2	0.0
	중	589.3	276.9	0.0	920.4	103.0	0.0
	하	738.2	276.9	0.0	1296.7	85.9	0.0
11	상	863.3	164.2	0.0	1163.9	92.8	0.0
	중	486.2	164.2	0.0	973.3	124.6	0.0
	하	555.2	164.2	0.0	1153.5	104.4	0.0
12	상	410.7	164.2	0.0	623.7	88.9	0.0
	중	247.3	164.2	0.0	390.1	74.9	0.0
	하	313.8	164.2	0.0	443.5	90.8	0.0

본 연구에서는 정립된 추계학적 선형계획 모형 5를 선형계획해석 프로그램인 LINDO를 이용하여 금광저수지의 유효저수량을 산정하였다. 모형 5의 허용최대방류량 제약조건식은 적용 가능한 최대방류량 결정이 난해하여 본 분석에서 고려하지 않았으며, 물수지 분석과

같이 두가지 경우로 저수지의 유효저수량을 산정하였다. 첫 번째는 가지야마공식에 의한 순별 유출량을, 두 번째는 Tank모형에 의한 일별 유출량을 순별로 환산한 값을 적용하였으며 분석결과는 표 5와 같다. 분석된 저수지의 유효저수량은 초과확률 유입량에 따라 주로 변

표 5. 금광저수지 유효저수량 분석 결과

유출량 산정	유효저수량 (천m ³)	신뢰도 (%)	시간 간격 (일)	비 고
가지야마공식	12,412	90	10	허용최소 방류량은 $q_i^{0.1}$
Tank 모형	11,963			

화하므로 이들은 저수지의 신뢰성 분석과 함께 설계기준에 따라 결정될 것이다.

표 5에서 보는 바와 같이 가지야마 공식을 적용할 때 금광저수지의 유효저수량은 12,412천m³으로, Tank 모형을 적용할 때 금광저수지의 유효저수량은 11,963천m³으로 분석되었다. 추계학적 선형계획모형에 의한 금광저수지의 유효저수량은 현재 유효저수량 10,550천m³보다 크게 분석되었으며, 표 2의 저수지 모의운영에 의한 필요저수량보다 역시 크게 분석되었다. 이는 저수지 모의운영에 의한 유효저수량 산정은 주로 저수지의 유입량과 관개용수를 고려한 물수지 분석에 의한 결과이고, 선형계획모형은 주로 유출량만을 고려한 결과이다. 한편 저수지 모의운영에 의한 유효저수량 산정에 있어서 매년의 필요저수량을 연최대치계열로 하여 빈도해석을 적용하는 방법을 적용하고 있으나, 저수지 모의운영에 의하여 매년의 필요저수량은 이전 년도말의 필요저수량 값이 매년 이월(carry-over)되기 때문에 빈도해석의 기본 가정인 자료의 독립성 등을 결여할 수 있다.

가지야마 공식 및 Tank 모형의 유출량에 의한 금광저수지 필요저수량은 저수지 모의운영에 의한 값보다 크므로, 2002년 현재 관개면적 1,885.0 ha에 관한 저수지 모의운영에서 분석기간내 물부족 현상은 발생하지 않는다. Yeh(1985)는 선형결정법칙(LDR)을 포함한 선형계획모형에서 시간 간격이 월단위와 같이 길 때는 저수지 유효저수량이 과다 산정이 될 수 있다고 지적한 바 있다. 농업용 저수지의 저수기록에 의하면 10일 동안 일별 최대저수량과 최소저수량의 차이는 유효저수량의 약 5% 정도이다(농업기반공사, 1990 - 2002). 따라서 본 분석에서는 시간 간격을 10일 단위로 채택하였다. 유효저수량과 관개면적의 비를 저수지의 단위저수량(mm)이라 한다. 분석결과에 의하면 tank모형을 적용한 저수지 모의운영에 의한 저수지 규모의 단위저수량은 469.0mm이고, tank모형을 적용한 선형계획모형에 의한 저수지 규모는 634.0mm로 용수공급 능력 및 신뢰도가 높아짐을 알 수 있다.

4. 결 론

저수지 모의 운영을 통한 금광저수지의 유효저수량은 현재 유효저수량보다 작게 평가되었으며, 이는 저수지 준공 후 관개면적의 감소와 작부체계의 변화에 기인된 것으로 판단된다. 선형계획모형을 이용한 저수지 분석에 있어서 선형결정법칙은 Chance-constrained model과 함께 분석년수와 관계없이 제약조건식을 줄이는데 기여한다. 선형계획모형에서는 저수지 내에서 발생하는 증발량과 같은 손실은 고려되지 않았지만 저수지의 연속성 제약조건식에 손실항을 첨부하면 손실량을 포함할 수 있다. 추계학적 선형계획모형에 의한 유효저수량은 현재 유효저수량보다 크게 분석되었다. 이는 저수지 모의운영에 의한 유효저수량 산정은 주로 저수지의 유입량과 관개용수를 고려한 물수지 분석에 의한 결과이고, 선형계획모형은 주로 유출량을 고려한 결과이다. 또한 저수지 모의 운영을 통한 유효저수량 산정은 빈도해석 단계에서 연최대 필요저수량 자료의 독립성을 결여하고 있음을 확인하였다.

따라서 농업용저수지의 유효저수량 결정시 본 연구에서 제시된 선형계획모형을 적용하여, 우선 유역으로부터의 유출량 및 최소방류량에 의한 적정한 유효저수량을 결정하고, 저수지 모의운영을 통하여 결정된 유효저수량의 성능을 평가하는 것이 타당하다. 유역의 수자원부존량을 감안하여 저수지의 유효저수량을 결정하는 선형계획모형에 있어서, 유역의 유출량은 직접관측을 통한 검정이 이루어 질 때, 보다 더 타당한 저수지의 유효저수량을 설정할 수 있다. 또한 본 연구에서 분석된 선형계획모형에 의한 유효저수량은 저수지 재개발사업 또는 여수로 구조개선에 의한 유효저수량 증대 계획시 저수지의 용수공급 능력 분석에 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-4-1)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 과학기술부 (2003a). 21세기 프론티어연구개발사업, 수자원의 지속적 확보 기술개발사업, 지속가능한 댐 개발 기술(2차년도연구보고서), 고려대학교.
- 과학기술부 (2003b). 21세기 프론티어연구개발사업, 수자원의 지속적 확보 기술개발사업, 지속가능한 하천수 개발 기술(최종보고서), 인하대학교.
- 김태철, 노재경, 박승기(1992). 관개저수지의 이수관리방법, **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제34권 제1호, pp. 33~40.
- 농림부(1989). 농업생산기반정비사업계획설계기준, 콘크리트담판
- 농림부(2002). 농업생산기반정비사업계획설계기준, 필답면
- 농업기반공사(2000). Hydrologic Operation Model for Water Resources, HOMWRS.
- 농업기반공사 안성지부 (1990-2002). 금광저수지 연도별 저수율.
- 수해방지대책기획단 (2003). 범 정부차원의 수해방지 대책.
- 안승섭, 장인수, 이수식 (1997). "소규모 저수지의 최적용수 공급능력 결정에 관한 연구." **한국농공학회지**, 한국농공학회, 제39권, 5호, pp. 109~122.
- Charles Revelle, Erhard Joeres, and William Kirby (1969). "The Linear decision rule in reservoir management and design." *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 4. pp. 767~777.
- Loucks, Daniel P. and Philip J. Dorfman (1975). "An Evaluation of some linear decision rules in chance-constrained models for reservoir planning and operation." *Water Resources Research* Vol. 11, No. 6. pp. 777~782.
- Loucks, Daniel P., Jerry R. Stedinger, and Douglas A. Haith (1981). *Water resource system planning and analysis*. Prentice-Hall, N. J. 1981.
- Mays, L. W. and Y. K. Tung (1992). *Hydrosystems Engineering Management*. McGraw-Hill, Inc.
- Yeh, W. W-G (1985). "Reservoir management and operations models: A State-of-the-Art Review." *Water Resources Research* Vol. 21, No. 12. pp. 1797~1818.

(논문번호:04-07/접수:2004.01.28/심사완료:2004.04.14)