기존 농업용 댐의 수자원 능력 평가
(Linear Program Model for Estimating Reservoir Capacity of Existing Agricultural Dam)

안 태진*, 정 병호*, 전 호원**, 박 정웅**

1. 서론

정부의 장기 용수 수요량추정에 의하면 2001년에 330억m^3, 2011년에는 370억m^3으로 추정되어 년차적 용수개발이 필요한 것으로 나타났다. 그러나 지표수 개발의 주수원공인 댐의 건설은 정치, 경제, 사회, 환경, 생태, 수문학적인 제약이 따르기 때문에 신규 댐 건설의 추진은 어려움이 많이 따른다. 따라서 새로운 용수개발도 물론 중요하지만 기존에 건설되어 있는 댐의 저수량을 합리적으로 운영하고 용수분배시스템이나 물관리에 만전을 기하여 개발된 용수량의 이용을 극대화해야 할 것이다. 생활 및 공업용수는 관수로 시스템으로 공급되고 있으나 관로의 노후화 및 파열에 의한 용수의 손실은 약 20-30% 정도로 추정하고 있다. 농업용수는 주로 개수로식인 용수로시스템으로 공급되고 있어 수로손실과 포장 물관리에 의한 손실 또한 약 30-40% 정도로 추정하고 있다. 이러한 용수의 손실을 줄이기 위해서 선진국에서는 원격측정 및 원격제어(TM/TC) 시스템을 물관리에 도입하고 있으며 우리나라에서도 일부 기관에서 도입하고 있다. 이와 더불어 용수의 재활용 방안, 중수도, 해수의 담수화 등도 증가하는 용수 수요량에 적극 대비할 수 있다. 이와 별도로 기존 농업용댐의 유효저수량을 증가시키는 방법으로 댐승상도 고려해 볼 수 있다. 대부분의 농업용댐의 여수토(spillway)는 자유 물넘이식으로 비교적 간단한 공법으로 저수지의 저수량을 증가시킬 수 있다. 이 경우는 홍수조절을 위한 검토가 신중히 시행되어야 함은 물론이다.

1991년도 기준으로 우리나라에서 용수의 수요량 중 생·공업용수는 74억m^3(24.8%), 농업용수는 151억m^3(50.7%)에 이르고 있다. 생·공업용수는 주로 건설교통부에서 시행한 다목적댐에서 공급하고 있고 농업용수는 농림수산부에서 시행한 중·소규모 댐에서 공급하고 있다. 근래에 용수절약형 품종개량 및 재배방법 개발과 농수산물의 시장이 개방됨에 따라 용수가 많이 필요로 하는 논작물에서 고수익 밭작물로 바뀜에 따라 우리나라의 총 물수요량 중 절반이 넘는 농업용수의 수요양상 또한 변하고 있다. 대부분의 농업용댐은 유역의 상류측에 위치하고 있어 수질은 중·하류측 어느 저수지의 수질보다 양호하다. 본 논문에서는 최적화기법의 한 방법인 추계학적 선형모형을 저

---

* 농어촌진흥공사, 농어촌구조연구소
** 서울산업대학교, 토목공학과

수지 시스템에 적용하여 해석함으로서 임의 지구의 유효저수량과 경작지 개발면적을 추정하여 보았다.

2. 선형계획 모형의 정립

저수지 유효저수량 결정 방법으로는 Ripple의 누가용적곡선(mass curve) 해석법과 저수지의 모의운영 해석법(reservoir operation study)등이 주로 이용되고 있으나 여기서는 선형계획(Linear Programming)을 이용하여 저수지의 규모와 경작지 개발면적을 결정하였다.

2.1 선형결정법칙(Linear Decision Rule)

저수지 분석에 적용된 선형결정법칙은 Revelle(1969)가 처음으로 제안한 이후로 많은 연구자들에 의하여 여러 형태로 개선되어 저수지 설계와 운영관리 문제를 선형계획으로 해석하는데 크게 기여 하였다. 저수지 분석에 적용한 선형결정법칙은 다음식과 같다. x = s - b 여기서 x는 어느 임의 기간의 방류량, b는 선형결정법칙의 매개변수 그리고 s는 임의 기간 바로 앞 기간의 저수량을 의미한다.

2.2 확정론적 선형모형(Deterministic Formulation)

선형계획 이론에 의거 저수지 유효저수량과 경작지 개발면적을 결정하기 위한 선형계획 모형은 M1과 같이 정립하였다.

(M1) Maximize: A

Subject to: $c \ge s_t$ t=1, . . . , 240 (1. 1. a)

$s_t \ge s_{\min}$ t=1, . . . , 240 (1. 2. a)

$x_t \ge Q_i$ t=1, . . . , 240 (1. 3. a)

$Q_i \ge D_i (= CE_i * A)$ i=1, . . . , 20 (1. 4. a)

여기서 r_t: 20년 중 t월의 저수지내 유입량

x_t: 20년 중 t월의 방류량, 결정변수

s_t: 20년 중 t월의 저수량, 결정변수

Q_i: 년 중 i월의 필요수량, 결정변수

D_i: 년 중 i월의 평균수요량

CE_i: 년 중 i월의 단위면적당 평균수요량

A: 경작지 개발면적, 결정변수

b_i: 년중 i월의 선형결정법칙의 매개변수, 결정변수

c: 저수지 유효저수량, 결정변수

$s_{\min}$: 최소저수량 (a_m·c으로 표현하고 a_m은 소수로 표현됨)

s_o : 초기저수량 (a_o·c으로 표현하고 a_o는 소수로 표현됨)

위의 선형계획 모형을 살펴보면 식(1.1.a)는 유효저수량 제약조건(reservoir capaity constraint)으로서 t월말의 저수량(s_t)는 유효저수량(c)보다 작거나 같아야 한다. 식(1.2.a)는 최소저수량 제약조건으로서(minimum storage constraint)으로서 t월말의 저수량(s_t)는 최소저수량($s_{\min}$)보다 크거나 같아야 한다. 식(1.3.a)는 방류량 제약조건(release constraint)으로서 t월의 방류량(x_t)는 i월의 필요수량(Q_i) 보다 크거나 같아야 한다. 식(1.4.a)는 평균수요량 제약조건 (demand constraint)으로서 i월의 필요수량(Q_i)은 평균수요량(D_i)보다 크거나 같아야 한다. 따라서 모형 M1은 식(1.0.a) - (1.4.a)의 제약조건이 구성하는 분석가능영역(feasible region)에서 목적함수인 경작지 개발면적(A)을 최대화하며 이때 저수지의 유효저수량도 결정된다.

선형결정법칙은 다음과 같다. $x_t = s_{t-1} - b_i \cdots$ (1) 저수지에서 연속방정식은 $s_t = s_{t-1} + r_t - x_t$이며, t월말의 저수량($s_t$)는 t-1월말의 저수량($s_{t-1}$)에 t월의 유입량($r_t$)을 합한것에 t월의 방류량($x_t$)을 뺀것과 같다. 식(1)을 저수지내 연속방정식에 대입하여 정리하면 $s_t = s_{t-1} + r_t - s_{t-1} + b_i$, $s_t = r_t + b_i \cdots$ (2), $s_{t-1} = r_{t-1} + b_{i-1} \cdots$ (3) 이된다. 또한 식(3)을 식(1)에 대입하면 $x_t = r_{t-1} + b_{i-1} - b_i \cdots$ (4) 따라서 모형 M1에 식(2)와 식(4)를 대입하면 다음 모형 M2와 같다.

(M2) : Maximize: A

Subject to:

$c - b_i \ge r_t$	t=1, . . . , 240	(1.1.b)
$r_t + b_i \ge s_{\min}$	t=1, . . . , 240	(1.2.b)
$r_{t-1} + b_{i-1} - b_i \ge Q_i$	t=1, . . . , 240	(1.3.b)
$CE_i * A - Q_i \le 0$	i=1, . . . , 20	(1.4.b)

모형 M2의 제약조건식의 개수를 세어보면 분석기간은 20년으로 하였으므로 각 조건식의 합은 740개 이다. 이 많은 방정식을 선형결정법칙(Linear decision rule)과 확정론적 제약조건식을 적용하여 49개의 제약조건 방정식으로 줄여서 해를 구하여 본다. $s_{\min} = a_m \cdot c, s_o = a_o \cdot c$라 하고 확정론적 선형모형으로 정립하면 다음 모형 M3과 같이 된다.

(M3) Max. A

s. t.

$$c - b_i \ge \max_n (r_{i+12n}), \quad i = 1, \ldots, 12 \qquad (1.1.c)$$

$$a_m c - b_i \le \min_n (r_{i+12n}), \quad i = 1, \ldots, 12 \qquad (1.2.c)$$

$$a_o c - b_1 \ge Q_1, \qquad (1.3.c)$$

$$Q_1 - b_{12} + b_1 \le \min_n (r_{12+12n})$$

$$Q_i - b_{i-1} + b_i \le \min_n (r_{i-1+12n}), \quad i = 2,\dots,12$$
$$CE_i * A - Q_i \le 0, \qquad i = 1,\dots,12 \qquad (1.4.c)$$

여기서 n는 분석년수(0, 1, 2, . . . , 19)이며 i는 t가 1, 2, . . . , 12까지는 t와 같고 t가 13이상 일때는 t를 12로 나눈 나머지와 같다. 예를 들어 t=6 이면 i도 6이고 t가 13이면 i는 1이다. $\max_n(r_{i+12n})$는 분석기간동안 월별 최대유입량이고, $\min_n(r_{i+12n})$은 월별 최소유입량을 의미한다. 위 모형에서 보는 바와 같이 제약조건 방정식의 수는 49개로 줄었으며 식의 우변은 호내 유입량으로 되었다. 확정론적 선형모형에서 사용된 유입량에는 확율개념이 수문변량의 불확실성이 결여되어 저수지의 신뢰성(reservoir's reliability)에 관한 언급이 없으므로 월유입량을 확율변수(random variables)로 처리하여 추계학적 선형모형(stochastic formulation)으로 변환하기로 한다.

2.3 추계학적 선형모형

추계학적 모형에서 유입량을 확율변수로 취급하기 위하여 제약조건식을 Chance - constraint 개념을 도입하였다. 식 1.1.c를 Chance - constraint로 표현하면 다음과 같다. $c - b_i \ge r_i(\alpha_1)$ 여기서 $r_i(\alpha_1)$은 유입량 r_i의 확율이다. 1월 즉 i=1인 경우를 살펴본다. 지금 유입량(r_i)는 평균(μ_i)와 분산(σ_i^2)을 갖고 정규분포 한다고 하고 Chance - Constraint를 다시 쓰면 $p[r_i \le c - b_1] \ge \alpha_1$ 이 된다. $c - b_1 = z$, α_1의 확율을 0.9라하면 $z \ge r_1^{0.9}$일 경우에 누가정규분포에서 $p[r_i \le z] \ge 0.9$를 만족한다.

Chance - constraints에서 최대유입량은 초과확율 10%인 유입량 ($r_i^{0.9}$)으로 하고 최소유입량은 초과확율 90%인 유입량 ($r_i^{0.1}$)으로 한다. 이를 이용하여 확정론적 모형을 추계학적 모형으로 변경하면 모형 M4와 같다. 여기서 어떤 초과확율 유입량을 사용하느냐는 설계기준에 의한다. 초과확율유출량의 추정은 멱변환법(power transformation)을 적용하였으며 표본지구의 유출량을 계산한 결과는 표1에 나타내었다.

(M4) Max. A

s.t.
$$c - b_i \ge r_i^{0.9}, \qquad i = 1,\dots,12 \qquad (1.1.d)$$
$$a_m c - b_i \le r_i^{0.1}, \qquad i = 1,\dots,12 \qquad (1.2.d)$$
$$a_o c - b_1 \ge Q_i \qquad (1.3.d)$$
$$Q_1 - b_{12} + b_1 \le r_{12}^{0.1}$$
$$Q_i - b_{i-1} + b_i \le r_{i-1}^{0.1}, \qquad i = 2,\dots,12$$
$$CE_i * A - Q_i \le 0 \qquad i = 1,\dots,12 \qquad (1.4.d)$$

3.0 추계학적 선형모형에 의한 표본지구의 해석

식(1.1.d)-식(1.4.d)의 제약조건식으로 구성된 모형을 선형계획 전산프로그램으로 해석하기 위해서는 b_i에 대해 추가정의가 필요하다. 즉 b_i 값이 음수 또는 양수일 경우를 대비하여 $b_i = h_i - g_i$로 한다. 따라서 수학적인 모형은 다음 모형 M5와 같이 되며, 매달 90%의 신뢰성을 갖는 최대 및 최소 유입량, 최소저수량, 수요량 등의 요구조건에 충족하는 경작지 개발면적과 저수지의 유효저수량을 결정한다. 여기서 a_m은 0.1, a_o는 0.6으로 하였다.

(M5) Max. A

s. t.

$$c + g_i - h_i \ge r_i^{0.9},\ \ i = 1,\ldots,12 \qquad (1.1.e)$$

$$a_m c + g_i - h_i \le r_i^{0.1},\ \ i = 1,\ldots,12 \qquad (1.2.e)$$

$$a_o c + g_1 - h_1 \ge Q_1 \qquad (1.3.e)$$

$$g_1 - h_1 - g_{12} + h_{12} + Q_1 \ge r_{12}^{0.1}$$

$$g_i - h_i - g_{i-1} + h_{i-1} + Q_i \ge r_{i-1}^{0.1},\ \ i = 2,\ldots,12$$

$$CE_i * A - Q_i \le 0,\ \ \ i = 1,\ldots 12 \qquad (1.4.e)$$

모형 M5을 해석하기 위하여 표본지구의 저수지에 적용하였다. 표1의 입력자료를 이용하여 선형계획 전산프로그램으로 모형 M5을 분석1(option 1)과 분석2(option 2)로 구분하여 분석하였다. 분석1에서는 초과확율 90%와 10%의 유출량을 적용한 결과, 경작지 개발면적과 저수지의 유효저수량은 각각 46,336.0 ha, 15,904.0 ha-m 이었다. 분석2에서는 분석1를 근본으로하고 비관개기(1-3월, 10-12월)에 생·공업용수를 월 20ha-m를 공급하는 것으로 하여 분석한 결과, 경작지 개발면적과 저수지의 유효저수량은 각각 46,244.0 ha, 15,847.0 ha-m 이었다. 표본지구의 경작지 개발면적과 유효저수량은 각각 32,651.0ha, 20,600ha-m이다.

4. 요약

제안된 모형은 저수지의 유효저수량 및 경작지 개발면적을 결정할 뿐만 아니라, 분석 결과로 수립되는 선형결정법칙은 저수량과 방류량의 관계식으로 저수지 운영에 필요한 자료를 얻을 수 있으며, 추정된 선형결정법칙을 이용한 저수지 모의운영(simulation)을 통하여 선형계획에 의하여 결정한 저수지의 유효저수량의 능력을 검정하고 수문인자의 계절성과 불확실성을 극복할 수 있다. 본 모형으로 추정된 저수지 유효저수량은 주로 초과확율 유입량에 따라 변하므로 이들은 저수지의 신뢰성 분석과 함께 설계기준에 의하여 할 것이다.

본 모형으로 구한 표본지구의 경작지 개발면적과 저수지의 유효저수량은 표본지구의 사업 계획시 결정된 경작지 개발면적보다 크고 유효저수량보다 작다. 사업계획시 저수지의 규모를 결정하기 위하여 시간간격이 10일인 저

수지내 물수지에 의한 방법을 적용하였으며, 본 논문에서 적용한 최적화 모형의 시간간격은 월단위이므로 추정된 내역에 대한 신뢰도는 당연히 낮다. 따라서 본 모형에서의 시간간격을 1주일 또는 1일로 하여 저수지의 유효저수량을 결정하고, 결정된 저수지 규모에 관한 모의운영을 실행하여 검정하면 결과의 신뢰도를 높일 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 윤 용남, 한국수자원의 이용관리, 동북아의 물 2000년 심포지움, 1995
2. Charles Revelle, Erhard Joeres, Williom Kirby, The Linear decision rule in reservoir management and design, Water Resources Research Vol 15, No. 4, 1969.
3. Daniel P. Loucks, Philip J. Dorfman, An Evaluation of some linear decision rules in chance - constrained models for reservoir planning and operation, Water Resources Research Vol. 11, No. 6, 1975.
4. Daniel P. Loucks, Jery R. Stedinger, Douglas A. Haith, Water resource system planning and analysis, Prentice - Hall, N. J. 1981
5. G. V. Loganathan, C. Y. Kuo, T. C. McCormick, Frequency analysis of low flows, Depart. of Civil Eng., Virginia Polytechnic Institute and State Univ., 1985

표1. 입력자료

단위: ha-m, a_m = 0.1C, a_o = 0.6

월	초과확율 90% 유출량, $r_i^{0.1}$	초과확율 10% 유출량, $r_i^{0.9}$	평균수요량, ha-m/ha, CE
1	407.0	946.5	0.0
2	413.8	1144.1	0.0
3	541.8	1521.5	0.0
4	1104.2	4081.5	0.0081
5	685.4	2918.2	0.0167
6	427.5	6264.7	0.2340
7	2135.6	12037.2	0.1338
8	2952.9	11814.0	0.1878
9	919.7	9463.5	0.0735
10	851.6	1830.4	0.0
11	576.3	1497.0	0.0
12	514.9	834.6	0.0