확률행렬법을 이용한 저수용량 산정에 관한 연구

○ 최영욱[1] , 심명필[2] , 김광일[3]

1. 서론

근래의 도시화·산업화 및 인구의 급속한 증가는 새로운 물수요를 발생시킴으로서, 수자원 공급측면에서의 저수지의 축조와 수요측면에서의 기존 저수지의 효율적인 운영, 관리에 관심을 불러일으키고 있다. 저수지 설계에 있어서 유효저수용량의 산정방법에 대한 연구는 많이 진행되어 왔으나, 이들은 방법별로 많은 차이를 나타내고 있으며, 또한 용수수요의 변동을 합리적으로 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 극한기간이 다른 저수지의 유효저수용량의 산정방법의 차이를 분석하고자 하였으며, 해석의 관위기간이 다를 때의 결과의 차이와 용수수요의 증감에 따른 저수지의 상태를 분석하여, 각각의 방법에 대한 적용성을 검토하였다. 극한기간은 누가곡선법 최저유량 분석법, Alexander법으로 검토하였고, 여기서 극한기간의 차이가 큰 안동댐과 대청댐을 분석대상 지점으로 선정하였다. Moran형 확률행렬법을 이용하여 유효저수용량, 방류량, 저류상태의 관계를 구하였으며, 각각을 변화시켜 이에 따른 저수지의 고갈확률을 얻었다. 갈수빈도분석으로 최대한발시의 용수부족량을 고려하여 재현기간별 유효저수용량 및 공급수량을 산정하였고, 저수지 설계와 운영에 이용할 수 있는지를 검토하였다.

2. 이론적 배경

저수용량을 결정하는 방법은 Rippl(1883) 이후 서로 다른 많은 접근법들이 이제까지 연구되어 왔다. 이들 저수용량을 결정하는 방법은 여러 가지 범주로 나눌 수 있는데, 자료의 처리 방법에 따라 극한기간법(Critical Period Method)과 확률행렬법(Probability Matrix Method), 그리고 모의발생법(Procedures Based on Data Generation)으로 나눌 수 있으며, 예비설계방법(preliminary design techniques)과 최종설계방법(final design techniques), 그리고 특수방법(special techniques)으로 분류할 수 있고, 이 외에도 경험적 방법, 실험적 방법, 해석적 방법의 세 가지, 확정론적 분석법과 추계학적 분석법의 두 가지로 나누기도 하나 그 어느 것이나 유사한 분류법이라고 할 수 있겠다. 다만 McMachon과 Mein(1986)은 호주와 말레이시아의 다수의 하천에 여러 가지 저수용량 산정방법을 적용한 결과를 바탕으로 극한기간의 대소에 따라 각각 다른 산정방법을 사용할 것을 제안하고 있으며, 극한기간이 12개월 이상인 경우는 Gould의 Gamma법, McMahon의 경험적 방법, 그리고 Hardison의 이월저수량 분석법을 사용하도록 하고, 극한기간이 6개월 이하인 저수지에서는

---

1) 한국종합기술개발공사 근무
2) 인하대학교 토목공학과 교수
3) 신풍컨설턴트 회장

갈수빈도곡선을 사용할 경우에는 연중빈도법을 사용하여 산정된 저수용량을 10% 늘리도록 하였고, 갈수빈도곡선을 사용하지 않는 경우는 거동분석법을 사용할 것을 제안하고 있다.

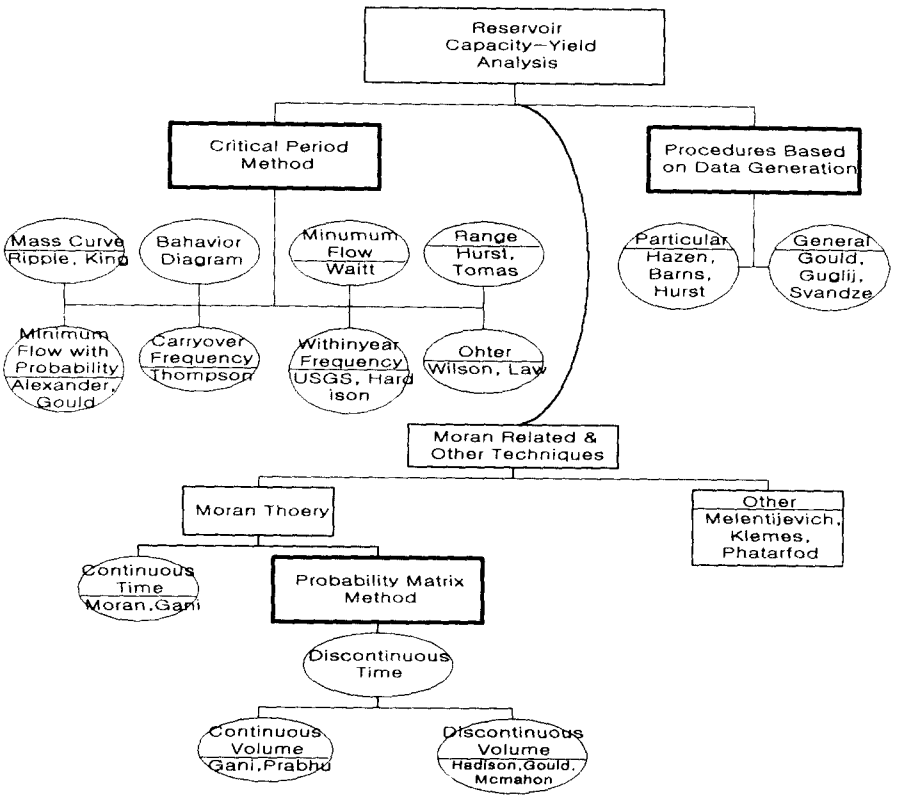

그림 1 저수용량 결정방법의 분류

확률행렬법은 Moran(1954)이 제시하고 이후 여러 사람들이 발전시킨 이론으로 저수용량 및 유입량, 방류량에 관한 적분방정식을 유도하여 저수지의 확률상태를 임의의 시간에 대하여 나타내었다. Moran은 다음과 같은 연속방정식을 사용하여 저수지의 초기상태 및 저수지로의 유입량, 방류량의 각각의 조합에 대한 종기상태의 발생확률을 천이확률행렬의 형태로 구성하여 저수지의 상태를 해석하였다.

$$\xi_{t+1} = \xi_t + I_t - M \quad (\text{이 때 } 0 \le \xi_{t+1} \le K)$$

여기서, ξ_t, ξ_{t+1} = t, $t+1$ 시간일 때의 저수지의 상태

I_t = t 시간의 유입량

M = t 시간의 방류량

K = 저수용량

일반적인 경우의 저수용량 해석을 위한 천이확률행렬은 다음 표 1과 같이 표현할 수 있다. 여기서, M은 단위기간당의 방류량을 나타낸다.

ξ_t / ξ_{t+1}	$0 \cdots\cdots\cdots i \cdots\cdots\cdots K$	
0	$\sum_{l=0}^{M} P_l$	$\sum_{l=0}^{M-i} P_l\ ;\ M \geq i$
j	$P_{M+j}\ ;\ 0 < j < K$	$P_{M-i+j}\ ;\ 0 < M-i+j < K$
K	$\sum_{l=K+M}^{N} q_l\ ;\ N \geq K+M$	$\sum_{l=M-i+K}^{N} q_l\ ;\ N \geq M-i+K$

표 1 천이확률행렬의 구성

연중빈도법에서 갈수빈도분석을 통한 저수용량 산정절차는 다음과 같다.

우선 갈수의 계속기간을 월단위 혹은 연단위로 선택하는데, 이에 따라서 앞서 유량자료 계열로부터 가뭄 계속기간(6개월, 1년, 2년 등)별로 갈수유량자료 계열을 작성한 후, 가뭄 계속기간 단위의 누적유량표를 작성하여 제일 작은 누적유량으로부터 추출한다. 이때 매번 추출되는 누적유량의 앞뒤에 위치하는 계속기간 수에 해당되는 누적유량은 다음번 추출에서 삭제하게 된다. 다음으로는 대수정규분포, 극치 I 형 및 III형 분포, Gamma 분포, Pearson TypeIII분포, Log Pearson TypeIII 분포, Generalized Extreme Value 분포 등으로부터 갈수유량자료 계열의 적정확률 분포형을 결정한다. 이 때 적정분포형 검정방법인 χ^2-Test, Kolmogorov-Smirnov Test 등에 의해 최적분포형을 설정한다. 최적 확률분포형이 결정되고 나면 확률분포형의 누가확률과 평균 재현기간 간의 관계에 의한 재현기간별 갈수유량을 추정한다. 추정된 이들 재현기간별 갈수유량의 누가용적곡선을 작성한 후 저수용량-상시유량-재현기간관계를 수립하여 저수용량을 산정한다. 이와 같은 방법으로 얻어진 갈수유량자료를 재현기간별이 같은 것끼리 누가하여 누가유입량곡선을 작성하고, 이에 용수수요량의 누가곡선을 중첩시켜 이 두 곡선간의 최대편차를 해당 재현기간의 저수용량으로 결정할 수 있다.

3. 적용 및 분석

확률행렬법을 적용하는 방법으로는 (1) 현재의 용수공급 계획량 및 유효저수용량을 입력자료로 하여 저수지의 고갈확률을 산정하고, 유효저수용량을 변화시켰을 때의 저수지의 상태변화를 해석하였고 (2) 용수수요량을 생공용수수요량과 농업용수수요량으로 나누어 이들 두 가지를 차례로 증감시키면서 용수수요에 따른 저수지의 상태변화를 보았으며 (3) 해석의 단위기간을 1년, 6개월, 3개월, 2개월, 1개월로 달리 하여 유효저수용량 결정 및 저수지의 상태를 해석하였다.

분석결과를 요약하면 다음과 같다. (1) 현재의 용수공급 계획량 및 유효저수용량을 입력자료로 하고 단위기간을 1개월로 하여 적용한 결과, 안동댐은 고갈확률이 8.36%~36.64%, 대청댐의 경우는 0.71%~6.40%로 월별로는 6월에 고갈확률이 가장 높고, 9~10월에 가장 낮게 나타났다. 유효저수용량의 변화에 따른 저수지의 상태를 해석한 결과, 안동댐에 대해 단위기간을 1개월, 유효저수용량을 10, 20, 30, 38, 50, 60 *units*로 변화시켜 해석하였을 경우 11월의 고갈확률이 각각 35.43%, 19.04%, 15.62%, 14.69%, 13.96%로 나타났다. 이는 안동댐, 대청댐 모두 유사한 결과를 보인 것으로, 유효저수용량이 적을 때는 고갈확률의 변화폭이 매우 컸지

만 실제 유효저수용량보다 클 때에는 고갈확률이 소폭으로 변화하였다. (2) 생공용수 및 농업용수수요량을 1 *unit*씩 변화시키며 해석한 결과, 농업용수수요량의 증감에 따른 고갈확률의 변화폭은 일정하나, 생공용수수요량의 증감에 따른 변화폭은 앞서 유효저수용량의 변화에 따른 해석과는 반대로 생공용수수요량이 적을 때는 고갈확률의 변화폭이 적지만, 클 때는 변화폭이 크게 달라지는 것으로 나타났다. (3) 안동댐의 경우 단위기간이 6개월, 3개월, 2개월, 1개월 일 때 11월의 고갈확률이 각각 44.98%, 28.08%, 16.40%, 14.69%이고, 대청댐의 경우는 같은 조건일 때 고갈확률이 28.72%, 17.91%, 5.05%, 1.62%로 해석의 단위기간이 클수록 저수지의 고갈확률은 높게 산정되었다.

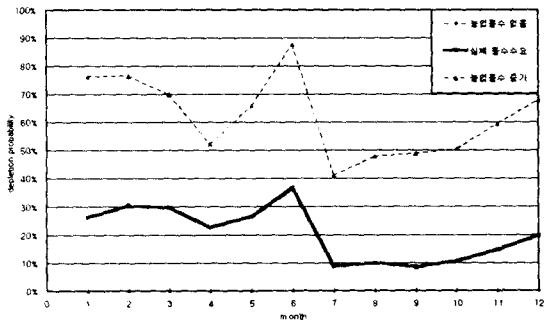

그림 2 농업용수 증감에 따른 월별 고갈확률(%) (안동댐)

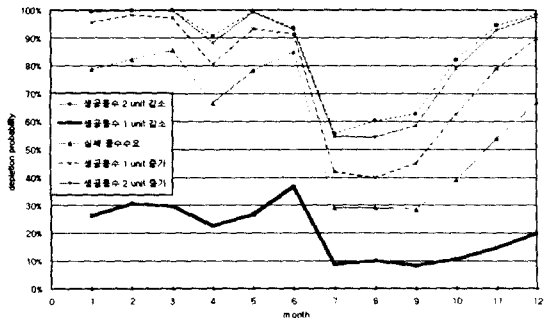

그림 3 생공용수 증감에 따른 월별 고갈확률(%) (안동댐)

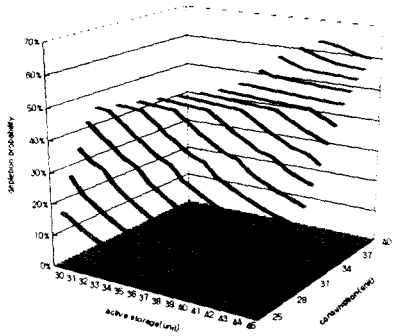

그림 4 저수용량, 방류량 증감에 따른 저수지의 고갈확률(%) (안동댐)

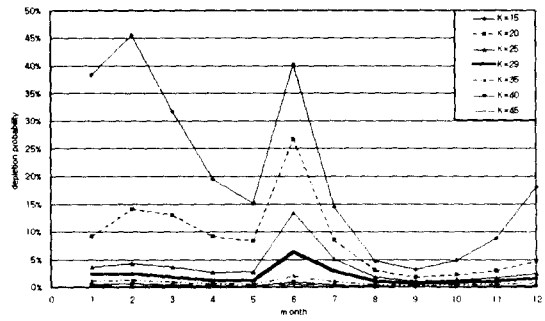

그림 5 저수용량 증감에 따른 월별 고갈확률(%) (대청댐)

갈수분석을 위한 지속기간은 각각 1, 5, 7, 15, 30, 60, 90, 120, 150, 183, 284, 365일로 하였으며, 일유량 자료를 이용하여 지속기간별 유출용적을 계산하고 그 중에서 최저유출용적에 해당하는 연최저치계열을 작성하였고, 적정분포형을 결정하기 위하여 대상분포형으로 2변수 Weibull, 2변수 Gamma, Log-Normal 분포형을 선택하였다. 적합도 검정은 Kolmogorov-Smirnov 검정을 유의수준 $\alpha = 0.05$ 로 실시하였다.

적합도 검정의 결과는 세 분포형 모두 적합한 것으로 판정되었으나, 본 연구에서는 한국수자원공사(1999)에서 여러지점의 갈수분석을 통해 적정분포형으로 제시한 2변수 Gamma 분포를 적정분포형으로 선정하였고, 이를 통해 각각의 지속기간별로 재현기간 2, 5, 10, 20, 25, 30, 40, 50, 100, 200년에 대해 산정한 갈수량을 산정하였다.

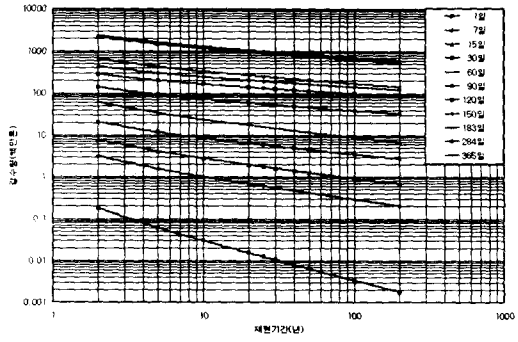

그림 6 갈수빈도곡선(대청댐)

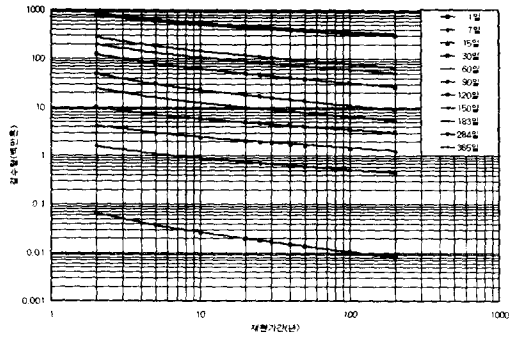

그림 7 갈수빈도곡선(안동댐)

다음으로는 이 갈수량 자료를 재현기간이 같은 것끼리 누가하여 누가유입량곡선을 작성하고, 이에 용수수요량의 누가곡선을 중첩시켜 이 두 곡선 간의 최대편차를 해당 재현기간의 저수용량으로 결정하였다. 용수수요량을 용수공급 계획량과 같게 했을 때와 5%, 10%, 15%, 20% 증가시켰을 때 각 재현기간별로 산정된 필요저수용량-용수수요량-재현기간의 관계 곡선은 그림 8, 그림 9와 같은데 대청댐은 현재의 용수공급 계획으로는 약 30년 빈도의 갈수에 대응할 수 있으며, 앞서 확률행렬법에서 단위기간을 1개월로 하여 산정한 월별 고갈확률인 0.71%~6.40%와도 비슷한 결과로 안정적인 것으로 나타났다. 반면 안동댐의 경우 200년 빈도의 갈수시 필요저수용량으로 산정된 6.61억㎥은 실제 유효저수용량 10.00억㎥와 상당한 차이를 보이고 있어 연중빈도법에 대한 적용이 적절하지 않음을 보여주고 있다.

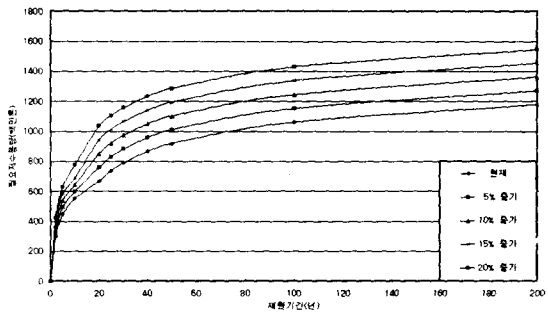

그림 8 필요저수용량-용수수요량-재현기간 관계(대청댐)

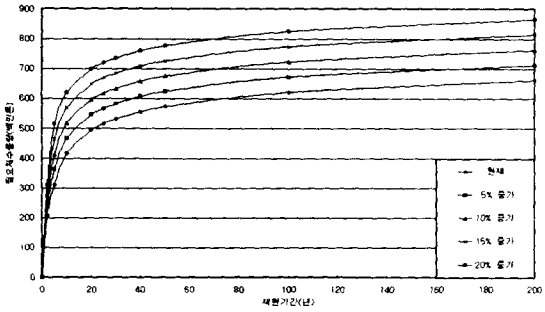

그림 9 필요저수용량-용수수요량-재현기간 관계(안동댐)

4. 결론

적용대상 댐은 누가곡선법, 최저유량 분석법, Alexander의 방법을 사용하여 극한기간을 구하였으며, 세 가지 방법으로 산정한 유효저수용량은 실제 유효저수용량과는 많은 차이를 나타내었다. 월별 용수수요량을 3~5%씩 증가시켜가며 유효저수용량을 산정한 결과 안동댐의 경우는 확률행렬법의 적용만이 가능하였으며, 대청댐의 경우 확률행렬법, 연중빈도법의 산정결과가 유사하였다. 특히, 대청댐의 경우는 용수공급이 비교적 안정적인 상태로 나타났으며, 연중빈도법에 의한 산정 결과, 30년 갈수시 필요한 유효저수용량과 실제 유효저수요량이 유사한 결과를 보였다. 확률행렬법은 월별 용수수요의 변동에 따른 해석이 용이하였다. 확률행렬법에서는 해석의 단위기간을 각각 1년, 6개월, 3개월, 2개월, 1개월로 하여 해석하였는데, 안동댐, 대청댐 모

두 유사한 결과로 단위기간이 클수록 저수지의 고갈확률은 높게 나타났다.

현재의 용수수요를 기준으로 유효저수용량의 변화에 따른 저수지의 상태를 해석하였을 때, 유효저수용량이 적을 때는 저수지의 고갈확률의 변화의 폭이 매우 컸지만, 실제 유효저수용량보다 커졌을 때는 소폭으로 변화하였다. 즉, 이는 적정 크기를 넘어선 저수지의 계획은 경제적인 효과가 떨어지므로 적정 유효저수용량을 산정해야 한다는 것을 보여주고 있다.

5. 참고문헌

김형수 (1985). 모의발생 저유하량 계열의 빈도분석에 의한 급수용 저수지의 용량 결정. 석사학위논문, 고려대학교.

노재경(1996). "댐 규모 결정을 위한 일·시간별 저수지 물수지 모형." 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 466~472.

서병하, 강경석 (1996). "댐 저수지 설계를 위한 갈수량 분석." 대한토목학회 논문집, pp. 543~554.

심명필, 이봉희, 김경탁 (1997). "저수지 물공급을 위한 신뢰도 분석에 관한 연구." 한국수자원학회 논문집, pp. 527-537.

윤용남 (1972). "급수용 저수지 설계를 위한 저유하량의 통계학적 해석에 관한 연구." 한국수문학회지, pp. 37~46.

최한규, 최영박, 김치홍 (1986). "추계학적 저수용량 결정에 관한 연구." 한국수문학회지, pp. 149~155.

한국수자원공사 (1999). 확률갈수유량 산정 및 이용방법 연구.

Chow, V. T. (1964). *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Co.

Haktanir, T. (1989). "Storage-Yield Relationships for Reservoirs by a Sequential-Operation Algorithm and Comparisons with Gould's Probability Matrix Method." Journal of Hydrology, 109, pp. 43~56.

McMahon, T. A. and Mein, R. G. (1986). *River and Reservoir Yield*. Water Resources Publications.

Srikanthan, R. and McMahon, T. A. (1985). "Gould's Probability Matrix Method 1. The Starting Month Problem." Journal of Hydrology, 77, pp. 125~133.

Srikanthan, R. and McMahon, T. A. (1985). "Gould's Probability Matrix Method 2. The Annual Autocorrelation Problem." Journal of Hydrology, 77, pp. 135~139.

Vogel, R. M. and Bolognese, R. A. (1995). "Storage-Reliability-Yield Relations for Over-year Water Supply Systems." Water Resources Research, 31, pp. 645~654.

Vogel, R. M. and Stedinger, J. R. (1987). "Generalized Storage-Reliability-Yield Relationships." Journal of Hydrology, 89, pp. 303~327.

Zsuffa, I. and Galai, A. (1987). *Reservoir Sizing by Transition Probabilities*. Water Resources Publications.