

## 한강수계 저수지군의 최적 월간운영률개발

○김 태순\*, 허 준행\*\*

### 1. 서론

저수지 운영을 위해서 필요한 여러 가지 운영규칙 중에서 월간 저수지 운영률은 가장 기본이 되는 규칙으로서 수자원 분야에서 오랜 동안 연구되어온 분야중의 하나이다. 저수지 운영률을 개발하기 위한 추계학적인 기법은 크게 양해적인 방법과 음해적인 방법으로 나눌 수 있다. 양해적인 방법은 모형을 구축하기 위한 컴퓨터 메모리의 용량이 상당히 커지고 확정적인 값이 아닌 저수지 시스템의 여러 요소들을 양해적으로 다시 표현해야만 하는 단점이 있으며 시스템을 구성하는 모든 요소들을 양해적으로 변환하는 과정에 있어서 시스템의 특성들을 재현시키기 어려운 단점이 있다(Yeh, 1985). 반면에 음해적인 방법은 주로 저수지의 유입량을 통계적인 방법으로 장기간에 걸쳐서 발생시키거나 보유한 자료가 장기간인 경우에는 원래의 자료를 그대로 사용하는 방법을 통해서 구축한 후에 최적화 기법을 적용해서 저수지 시스템의 출력값을 얻고, 이렇게 얻어진 결과값을 회귀분석등의 방법을 이용해서 저수지의 저류량이나 전월 유입량의 함수로 나타내어서 운영률을 결정하는 방법이다(Karamouz 등, 1992).

음해추계학적인 방법을 적용해서 운영률을 개발하는 것은 어렵지 않은 작업이지만 개발된 운영률을 실제 모의모형에 적용할 경우에 타당한 값을 얻기는 쉽지 않다. 더군다나 우리 나라와 같이 이수기와 홍수기의 구분이 뚜렷한 경우는 이수기에서 홍수기로 넘어가거나 홍수기에서 이수기로 넘어가는 과정에서 유입량이나 방류량 그리고 저류량 자료간의 상관성이 높지 않은 경우가 대부분이어서, 시계열모형으로 유입량을 발생시키고 최적화기법을 적용한 결과값을 회귀분석하는 단순한 과정을 통해서 개발된 운영률을 적용하기에는 무리가 있다. 따라서, 이런 문제점을 극복하기 위해서는 회귀분석이나 통계적인 기법과 함께 결과값들의 도시적인 해석이나 저수지 시스템의 각종 변수들간의 관계를 경험적으로 고려해서 운영률을 개발하는 과정이 필요하다. Ferreira와 Lund(1994)는 이와 같은 경험적인 기법을 이용해서 Missouri 강 유역의 월간 운영률을 개발한 바 있다.

본 연구에서는 월간 저수지 운영률 개발을 위해서 음해추계학적인 방법을 사용했다. 저수지 시스템의 가장 기본적인 입력자료인 유입량을 주기적 매개변수를 갖는 ARMA(1,1) 모형을 이용해서 발생시키고 이렇게 구축된 입력자료를 최적화기법중의 하나인 동적계획법에 적용해서 목적함수에 맞는 결과값을 얻어낸 후에, 통계적분석, 도시적 분석 그리고 경험적인 분석을 통해서 각 달마다 월초에 이미 알고 있는 값들을 이용해서 월말의 목표값을 얻을 수 있도록 구성하였다.

---

\* 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*\* 연세대학교 사회환경·건축공학부 토목공학전공 부교수

## 2. 시계열 모형과 동적계획법

주기적 매개변수를 갖는 ARMA(p,q) 모형은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다(Salas 등, 1980).

$$Z_{v,t} = \sum_{j=1}^p \phi_{j,t} Z_{v,t-j} - \sum_{i=1}^q \theta_{i,t} \varepsilon_{v,t-i} + \varepsilon_{v,t}$$

(1)여기서,  $Z_{v,t}$  는 주기성을 갖는 시계열자료,  $\phi_{j,t}$ ,  $\theta_{i,t}$  는 각각 자기회귀(autoregressive) 계수와 이동평균(moving average) 계수,  $\varepsilon_{v,t}$  는 독립 정규난수이다.

본 연구에서는 지체수(lag)가 1인 ARMA(1,1) 모형을 이용했다. 식 (1)을 이용해서 ARMA(1,1) 모형을 나타내면 다음 식과 같다.

$$Z_{v,t} = \phi_{1,t} Z_{v,t-1} - \theta_{1,t} \varepsilon_{v,t-1} + \varepsilon_{v,t} \quad (2)$$

이 모형을 이용해서 유입량( $\hat{Z}_{v,t}$ )을 발생시키기 위해서는 다음의 식 (3)을 적용한다.

$$\hat{Z}_{v,t} = \hat{\phi}_{1,t} \hat{Z}_{v,t-1} - \hat{\theta}_{1,t} \varepsilon_{v,t-1} + \varepsilon_{v,t} \quad (3)$$

여기서,  $\hat{\phi}_{1,t}$ ,  $\hat{\theta}_{1,t}$  는 산정된 매개변수이다.

저수지의 최적화를 위해서는 증분동적계획법을 이용하였다. 다음의 식 (4)는 증분동적계획법의 일반적인 목적함수를 나타낸 것이다.

$$F = \sum_{i=1}^T \left( \sum_{p=1}^{TP} F_1(p) - \left( \sum_{s=1}^{TR} F_2(s) \right)^2 \right) \quad (4)$$

여기서,  $T$  는 시간,  $TP$  는 전체 발전소의 개수,  $F_1(p)$  는 발전소(p)에서 생산하는 발전량,  $TR$  은 전체 저수지의 개수,  $F_2(s)$  는 저수지(s)에서의 말기저수위이다. 다음의 식 (5)~(7)은 각각 저수지 질량보존방정식, 방류량 제약조건, 저류량 제약조건을 나타낸다.

$$S_{t+1} - S_t + R_t = I_t \quad (5)$$

$$R_t^{\max} \geq R_t \geq R_t^{\min} \quad (6)$$

$$S_t^{\max} \geq S_t \geq S_t^{\min} \quad (7)$$

여기서,  $R_t$  는 방류량,  $I_t$  는 유입량,  $S_t$  는 저류량,  $t$  는 해당 월,  $\max$ 는 최대값,  $\min$ 은 최소값을 의미한다. 식 (4)의 목적함수와 식 (5)~(7)의 제약조건을 이용해서 다음의 recursion 방정식을 풀면 최적값을 얻을 수 있다.

$$f_{t+1}(S_{t+1}) = \text{maximize} \left[ \left( \sum_{p=1}^{TP} F_1(p) - \left( \sum_{s=1}^{TR} F_2(s) \right)^2 \right) + f_t(S_t) \right] \quad (8)$$

여기서,  $f_t(S_t)$  는 t월초의 저류량이  $S_t$  인 경우에, 1월초에서 t월초까지의 범위에서 구한 목적함수의 합을 의미한다.

#### 4. 모형적용

한강수계에는 화천댐(총저류량 1018MCM, 유효저류량 658MCM), 소양강댐(총저류량 2571MCM 유효저류량 1868MCM), 충주댐(총저류량 2280MCM, 유효저류량 1789MCM)의 대규모 댐이 있으며(한국전력공사, 1994), 이 댐들은 모두 북한강, 소양강, 남한강의 상류부에 위치하고 있다. 시계열 모형을 구축하기 위해서는 각 댐별로 기왕의 유입량 자료들이 필요한데 각 댐에서 관측된 자료기간이 서로 다르기 때문에 주기적 매개변수를 갖는 단변량(univariate) ARMA(1,1) 모형을 이용해서 150년간의 자료를 발생시켰다. 표 1은 기왕의 자료와 발생된 자료의 기본적인 통계값을 나타낸 것이다.

표 1. 기왕의 자료와 발생시킨 자료의 기본 통계값

월	기왕의 자료						발생시킨 자료					
	화천댐		소양강댐		충주댐		화천댐		소양강댐		충주댐	
	평균	표준 편차	평균	표준 편차	평균	표준 편차	평균	표준 편차	평균	표준 편차	평균	표준 편차
1	14.02	5.32	6.21	3.25	30.52	13.57	15.12	8.88	6.89	5.36	31.93	16.25
2	15.90	9.53	9.78	10.71	35.03	30.68	15.97	10.32	10.60	19.74	34.98	32.28
3	35.14	22.38	31.00	23.03	88.63	71.20	36.36	23.27	33.85	34.85	92.94	67.72
4	66.30	37.91	68.90	33.99	198.92	136.63	68.93	46.74	68.52	36.10	199.12	131.94
5	68.19	43.18	63.82	46.98	126.03	75.21	74.62	56.76	66.69	53.92	137.46	108.46
6	72.35	82.29	63.81	69.83	135.97	136.76	74.16	79.37	64.81	83.47	143.08	153.88
7	249.07	176.76	194.34	106.29	508.47	267.78	229.13	253.46	185.20	158.91	472.50	351.94
8	308.21	236.93	190.60	154.69	366.83	243.99	330.56	282.45	205.87	170.02	383.89	242.15
9	169.84	143.33	119.20	150.44	286.02	247.25	164.86	146.32	104.81	99.43	288.08	231.37
10	38.99	23.39	29.53	32.24	92.90	70.35	38.19	21.8	27.42	22.70	89.37	58.58
11	35.34	37.43	22.30	18.78	63.72	35.50	34.10	21.33	22.82	15.41	65.70	32.61
12	21.01	9.91	12.26	9.20	44.88	22.26	20.86	9.07	12.02	7.60	45.38	21.76

모형에서 적용한 목적함수는 식 (4)와 동일한 형태이고, 12월말의 목표저류량은 화천댐은 576MCM(million cubic meter,  $10^6 \times m^3$ ), 소양강댐은 1607.5MCM, 충주댐은 2134.1MCM으로 각 댐의 관측된 저류량의 평균값이다.

Kim과 Heo(2000)는 본 연구에서 사용한 기법인 음해추계학적 최적화기법을 이용해서 한강수계 댐군의 운영률을 구하고 모의운명을 통해서 그 적용성을 살펴본 바 있다. 이 논문에서는 운영률을 구하기 위해서 다음의 식 (9)와 같은 형태의 회귀식을 사용하였다.

$$R_t = a_1 I_t + b_1 S_t + c_1 \quad (9)$$

여기서,  $R_t$ 는 t월의 각 저수지의 방류량,  $I_t$ 는 t월의 각 저수지의 유입량,  $S_t$ 는 t월의 각 저수지의 초기저류량,  $a_1, b_1, c_1$ 는 회귀계수를 나타낸다. 식 (9)의 형태를 가지고 있는 운영률을 저수지군의 모의운영모형에 적용한 결과, 기왕의 댐 운영결과와 비슷한 값의 저류량과 방류량을 얻을 수 있었지만, 회귀식의 적합도를 나타내는 결정계수값이 상대적으로 작아서 회귀식의 독립변수와 종속변수간에 큰 관계가 없는 것으로 밝혀진 경우에는 식 (9)의 운영률외에 도시적인 해석을 통해서 운영률을 구하는 과정이 필요한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 위와 같이 결정계수만을 이용해서 운영률을 구하는 방법 대신에 다음과 같은 방법을 이용해서 운영률을 결정하였다.

- ① 최적화 모형을 통해서 얻은 결과값 중에서 총 초기저류량-말기저류량의 그래프를 그린다.
- ② 위에서 얻은 그래프를 이용해서 총 초기저류량을 알고 있는 상태에서 각 댐별로 월말의 목표저류량값을 구한다.
- ③ 최적화 모형을 통해서 구한 방류량 값들의 히스토그램을 도시한다.
- ④ 히스토그램이 하나의 구간에 집중되어서 나타나는 경우(Type I), 두 개의 구간에 집중되어서 나타나는 경우(Type II), 세 개의 구간에 집중되어서 나타나는 경우(Type III), 전구간에 고르게 분포되어 있는 경우(Type IV)의 4 가지 경우로 나눈다.
- ⑤ Type I~Type III의 경우는 집중되어서 나타나는 구간을 대표하는 방류량값과 유입량값을 구한다.
- ⑥ Type IV의 경우는 Kim과 Heo(2000)가 구한 운영률을 사용한다.

위의 방법으로 운영률을 구하기 위해서는 ①의 과정을 통해서 나온 그래프에서 말기저류량의 총 초기저류량에 따른 변화양상을 파악할 수 있어야 하고, ④의 과정에서 구간별 방류량을 적절한 값으로 선정하여야 한다. ⑥의 과정에서 이미 개발된 운영률을 사용한 것은 방류량이 여러 구간에 걸쳐서 분포되어 있기 때문이기도 하지만 소양강댐의 1월을 제외하고는 결정계수값이 0.8을 넘는 높은 값을 보여주기 때문이다.

#### 5. 모형적용 결과

그림 1은 2월의 총 초기저류량-말기저류량 그래프로서, 총 초기저류량의 값에 따라서 각 댐의 말기저류량이 일정한 패턴을 가지고 있음을 알 수 있다. 즉, 총 초기저류량의 값을 월초에 알고 있다면 각 댐화천댐, 소양강댐, 충주댐의 월말 목표저류량 값을 구할 수 있다. 그림 2는 10월의 경우로서 총 초기저류량이 5000(MCM)보다 작은 경우에는 월말 목표저류량이 일정한 패턴을 가지는 것으로 나타났다.

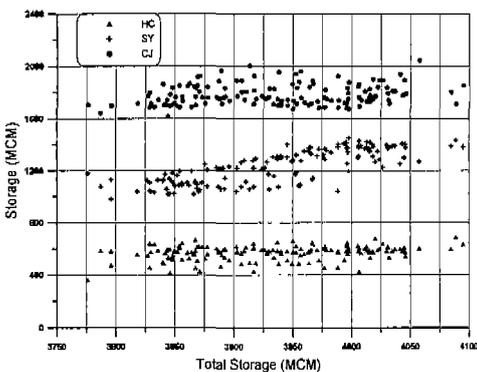


그림 1. 총 초기저류량-말기저류량(2월)

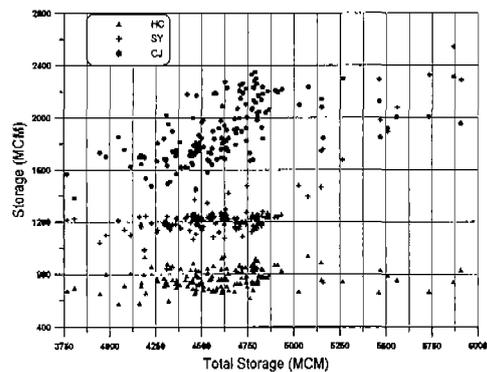


그림 2. 총 초기저류량-말기저류량(10월)

그림 1, 2와 같은 그래프를 통해서 각 저수지의 월말 목표저류량을 결정했으면, 방류량의 히스토그램을 통해서 방류량을 결정한다. 그림 3을 살펴보면 방류량이 250~300(MCM)인 구간사이에 전체 150개의 최적화 방류량 값 중에서 135개가 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 하나의 방류량 구간에 대부분의 최적화 방류량이 집중되어 있기 때문에 충주댐의 3월 방류량의 패턴은 Type I 이라고 할 수 있다. Type II(그림 4)와 Type III(그림 5)는 이런 집중구간이

2개이거나 3개인 경우를 의미한다.

Type IV는 최적화 방류량이 어느 구간에 집중되기 보다는 거의 전 범위에 걸쳐서 고르게 나타나는 경우를 의미한다. 그림 6의 경우는 화천댐의 방류량 중 7월에 해당하는 값들을 나타낸 것으로서, 방류량이 550(MCM) 이하인 경우에는 방류량 값이 어느 구간에 집중되지 않고 비교적 고르게 분포되어서 나타나는 것을 볼 수 있다. 이런 경우에는 방류량의 히스토그램을 이용해서 최적방류량을 결정하기가 어려워지며, Type IV인 경우에는 식 (9)의 결정계수가 0.80 이상의 높은 값을 갖는 경우가 대부분이기 때문에 Kim과 Heo(2000)가 이미 개발한 운영률을 사용하였다.

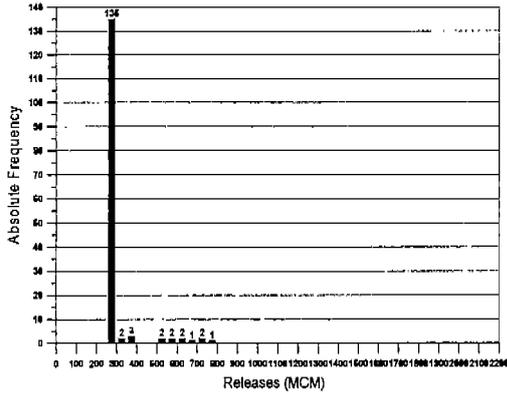


그림 3. 충주댐의 방류량(3월, Type I)

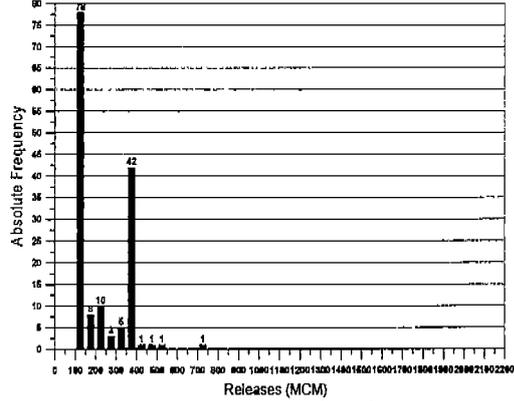


그림 4. 소양강댐의 방류량(8월, Type II)

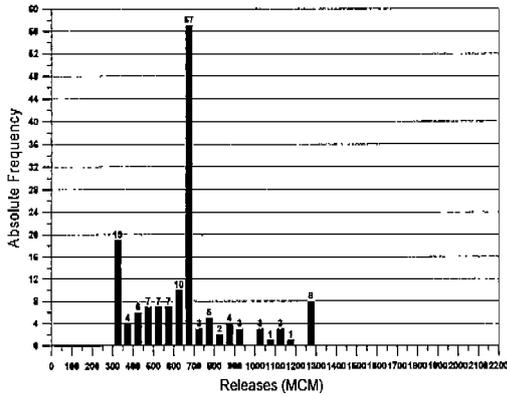


그림 5. 충주댐의 방류량(6월, Type III)

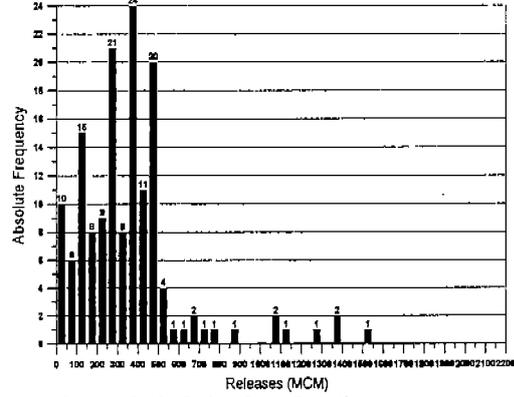


그림 6. 화천댐의 방류량(7월, Type IV)

표 2는 각 댐별로 방류량의 패턴형태를 나타낸 것으로 Type I은 모든 댐에서 6개월이 있는 것으로 나타났다. 화천댐은 1~2월, 4~6월, 10월이었고, 소양강댐은 2월, 7월, 9~12월, 그리고 충주댐은 1~4월, 10~11월이 Type I인 것으로 나타났다. Type II는 화천댐은 3월, 11~12월, 소양강댐은 3~6월, 8월, 충주댐은 5월, 7월, 12월이었고, Type III는 충주댐의 5~6월인 경우에 발생했다. 방류량이 분포되어서 나타나는 Type IV는 화천댐은 7~9월, 소양강댐은 1월, 충주댐은 8~9월로서 화천댐과 충주댐은 주로 홍수기에서 발생하는 것으로 나타났다.

표 2. 각 댐별 방류량 패턴표

댐 \ 패턴	Type I	Type II	Type III	Type IV
화천댐	6개	3개	·	3개
소양강댐	6개	5개	·	1개
충주댐	6개	2개	2개	2개

## 6. 결론

저수지의 운영률을 구하는데는 여러 가지 기법이 사용되지만 확정론적인 기법을 이용해서 운영률을 구할 때는 회귀분석에 의한 방법을 많이 사용한다. 회귀분석은 독립변수와 종속변수간의 상관관계를 이용해서 선형이나 비선형식의 형태로 그 관계를 나타내는 것으로서, 독립변수의 값만 알면 종속변수의 값을 양해적으로 구할 수 있는 장점이 있지만, 본 연구에서 사용한 저수지의 최적화 결과값과 같이 방류량이 집중되어 있거나, 저류량이 여러 구간에 걸쳐서 분포되어 있는 경우에는 적합한 회귀식을 얻기가 어려운 단점이 있다.

본 연구에서는 이와 같은 회귀분석의 단점을 피하기 위해서, 총 초기저류량-말기저류량의 그래프를 통해서 목표 말기저류량 값을 산정한 후에, 방류량의 히스토그램을 이용해서 그 패턴을 Type I ~ IV까지 분류해서 해당 월의 방류량값을 산정하였다. 또한, 방류량 값이 여러 구간에 걸쳐서 분포되어 있는 Type IV인 경우에는 기존에 개발된 운영률을 이용해서 방류량 값을 결정하였다.

## 7. 참고문헌

- 한국전력공사 (1994). 수문자료집.
- Ferreira, I., and Lund, J., R. (1994). *Operating rules from HEC-PRM results for the Missouri River system: Development and preliminary testing*. PR-22, USACE, Davis, California.
- Karamouz, M., Houck, M. H., and Delleur, J. W. (1992). "Optimization and simulation of multiple reservoir systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 118, No. 1, pp. 71-81.
- Kim, T., and Heo, J.-H. (2000). "Application of implicit stochastic optimization in the Han River basin." *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Hydro-Science and-Engineering*, KWRA, Seoul, Korea.
- Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V., and Lane, W. L. (1980). *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*. Water Resources Publications. Littleton, Colorado.
- Yeh, W. W.-G. (1985). "Reservoir management and operations model: A state of the art review." *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 6, pp. 987-993.