

# 연계 운영을 위한 병렬 저수지의 저수량 할당 방안

## Operating Rules for Allocating Storage among Reservoirs in Parallel for Coordinated Operation

이용대\*, 전승목\*\*, 김승권\*\*\*, 고익환\*\*\*\*

Yongdae Lee, Seungmok Jeon, Sheung-Kown Kim, Ick Hwan Ko

### 요 지

본 연구에서는 병렬로 구성된 저수지군 연계 운영을 위하여 병렬 저수지의 저수율에 대한 상대적 가중치를 고려한 저수량 할당 방안을 제시한다. 이를 위하여 기존 문헌 등에서 제시된 NYC Rule(New York City Water Supply Rule), Space Rule, 등가 저수위 등의 운영 방안을 낙동강수계 연계운영에 적용하여 용수공급 측면에서 비교하였다. 그리고 Space Rule을 변형하여 각 저수지의 저수율에 대한 상대적 가중치를 설정하고, 이를 바탕으로 불확실성을 감안한 실시간 모의 운영을 진행하여 기존 운영 방안과 효과를 비교 분석해 보았다. 이와 같이 제시된 방안은 실시간 운영, 최적화 모형의 가중치 설정, 유역 시뮬레이션 모형의 저수지 운영방안 설정 등에 활용이 가능할 것이다.

**핵심용어** : 저수지군 연계운영, 병렬 저수지 운영, 저수지 모의 운영, Space Rule, 등가 저수위

### 1. 서 론

저수지군 연계운영에서 최적화 모형이나 유역 시뮬레이션 모형 등 분석 모형을 수립하거나 적용할 때 또는 실시간 운영에 있어서도 병렬 저수지의 저수량을 할당하는 기준을 설정하거나 운영 기준을 세우는 것이 필요하다. 이와 같은 병렬 저수지의 저수량을 할당하는 방안은 용수공급, 수력발전, 홍수조절 등 다양한 목적을 기준으로 최적화 모형 및 저수지 운영 시뮬레이션 모형에 내재된 운영 Rule의 형태로 많은 연구가 진행되어 왔다. (Lund and Guzman, 1999)

그 중에서 Clark(1950)은 뉴욕시의 용수공급 시스템 운영을 위하여 미래에 여수로 방류가 발생할 확률이 최소가 되도록 하는 NYC Rule(New York City Water Supply Rule)을 제시하였고, Sand(1984)는 이를 선형 계획 모형으로 수립하였다. 그리고 Bower et al.(1966)은 NYC Rule의 특수한 형태로써, 여수로 방류량이 최소화 되도록 저류 공간을 할당하는 Space Rule을 제시하였다. 그리고 저수지 운영 시뮬레이션 모형으로 널리 사용되고 있는 미 공병단의 HEC-5(HEC, 1998)에서는 병렬 저수지의 유효저수율이 같게 유지되도록 하는 등가 저수위 기법을 사용하고 있다. 한편 Lund and Guzman(1999)는 직렬 및 병렬 저수지의 용수공급, 홍수조절, 수력발전, 수질보전 등의 목적에 맞는 운영 Rule을 종합 정리하였다.

본 연구에서는 2절에서 기존의 운영 Rule을 정리하고, 3절에서 각 운영 Rule을 최적 연계운영 모형

\* 정회원 · 고려대학교 산업시스템정보공학과 박사과정 · E-mail : ydlee@korea.ac.kr  
\*\* 준회원 · 고려대학교 산업시스템정보공학과 석사과정 · E-mail : wizardmoggy@syslab.korea.ac.kr  
\*\*\* 정회원 · 고려대학교 산업시스템정보공학과 교수 · E-mail : kimsk@korea.ac.kr  
\*\*\*\* 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 소장 · E-mail : ihko@kowaco.or.kr

에 적용하기 위한 방안을 제시하고, 4절에서 각 방안의 용수공급 측면에서의 효과를 분석하였다.

## 2. 기존 병렬 저수지 저수량 할당 방안

### 2.1 등가 저수위

등가 저수위는 HEC-5 (HEC, 1998)에서 사용하는 저수지의 저수량 할당 규칙(Rule)으로써, 병렬 저수지 시스템의 각 저수지의 유효 저수율이 모두 같도록 저수량을 결정하는 것이다. 즉, 각 저수지에 사수위, 저수위, 제한수위, 상시만수위, 홍수위 등과 같은 지침수위(index level)를 설정하고, 지침수위를 기준으로 한 유효 저수율(유효 저수용량 대비 저수량)을 보간법(interpolation)을 이용하여 계산하며, 각 병렬 저수지의 유효 저수율이 모두 같아지도록 저수량 및 방류량을 결정하는 것이다.

### 2.2 New York City Rule(NYC Rule)

NYC Rule은 Clark(1950)이 뉴욕시의 용수공급 시스템 운영에 처음 적용한 운영 규칙(Operations Rule)으로써, 용수 공급 부족을 최소화하는 가운데, 향후 여수로 방류(Spill)가 일어날 확률을 최소화 하는 운영 규칙이다. 즉 향후 여수로 방류(Spill)가 일어날 확률을 최소화함으로써, 여수로 방류량을 줄이도록 한다. 일반적인 NYC Rule은 다음 식 (1)~(3)을 만족하도록 하는 현재 기간 말의 저수량( $S_{fi}$ )과 현재 기간의 방류량( $R_i$ )을 결정한다. (Lund and Guzman, 1999)

$$h_i P[CQ_i \geq K_i - S_{fi}] = \lambda \text{ for all } i \quad (1)$$

$$R_i = S_{oi} + E[Q_i] - S_{fi} \text{ for all } i \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n R_i = R_{OT} \quad (3)$$

이때,  $h_i$ 는 저수지  $i$ 의 가중치,  $CQ_i$ 는 현재 기간 말부터 홍수기 말까지의 저수지  $i$ 의 유입량 총합으로써 확률변수(Random Variable)가 되며 보통 과거 실적 유입량 자료를 활용하게 된다. 그리고  $K_i$ 는 저수지  $i$ 의 저수용량,  $S_{fi}$ 는 현재 기간 말의  $i$ 저수지의 저수량,  $\lambda$ 는 모든 병렬 저수지에 동일하게 적용되는 상수,  $S_{oi}$ 는 저수지  $i$ 의 초기 저수량,  $R_i$ 는 저수지  $i$ 의 현재 기간의 방류량,  $R_{OT}$ 는 하루 총 수요량, 그리고  $E[Q_i]$ 는 현재 기간 유입량의 기대값으로써, 일반적으로 과거 자료 유입량 자료의 평균치를 사용한다. 식 (1)은 각 저수지의 여수로 방류가 일어날 확률과 가중치를 곱한 값이  $\lambda$ 로 일정해 지도록 하며, 식 (2)에서는 식 (1)이 만족되는 조건아래 각 저수지의 방류량 및 현재 기말 저수량을 결정한다. 그리고 식 (3)은 각 저수지의 방류량 총합이 하루 수요량만큼만 설정되도록 한다.

### 2.3 Space Rule (NYC Rule)

Space Rule은 앞으로 더 많은 유입량이 예상 되는 저수지에 더 많은 저수 공간을 유지하도록 하는 운영 규칙이다 (Bower et al. 1966). 용수공급 측면에서 Space Rule은 현재 기말 저수량을 식 (4)를 이용하여 결정한다.

$$\frac{K_i - S_{fi}}{EV(CQ_i)} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n K_i - V}{\sum_{i=1}^n EV(CQ_i)} \right) \text{ for all } i \quad (4)$$

이때  $V$ 는  $V = \sum_{i=1}^n S_{fi}$ 로써, 모든 저수지의 현재 기말 저수량 합과 같고, 식 (4)를 변형하면, 현재 기말 저수량은 식 (5)와 같이 결정된다.

$$S_{fi} = K_i - \left( \frac{\sum_{i=1}^n K_i - V}{\sum_{i=1}^n EV(CQ_i)} \right) EV(CQ_i) \text{ for all } i \quad (5)$$

식 (4)에서 보는 바와 같이 Space Rule은 각 저수지의 저수 가능 공간과 총 유입량의 기댓값의 비율을 모두 같게 만든다. 이를 통하여 앞으로 유입량이 많을 것으로 예상되는 저수지에 더 많은 저수공간을 할당 한다. 즉 앞으로 유입량이 많을 것으로 예상되는 저수지에 저수를 적게 하여, 여수로 방류량이 최소화 되게 함으로써 용수공급량을 증대시키는 운영방안이다.

### 3. 최적화 모형을 활용한 병렬 저수지의 저수량 할당 방안

2절에서 살펴본 기존의 병렬 저수지 저수량 할당 방안을 최적화 모형의 목적함수를 구성하는 저수지별 가중치 설정에 적용하여 저수량 할당이 이루어지도록 해 보았다. 그리고 일부 운영방안은 우리나라 저수지 시스템의 특성에 맞도록 수정하여 적용하고, 용수공급 측면에서 그 효과를 분석하였다.

#### 3.1 등가저수위

HEC-5에서 사용하고 있는 등가 저수위 개념을 선형 계획법을 활용한 최적화 모형에 적용하였다. 이를 위하여 그림 2와 같이 각 저수지를 여러 개의 저수 구간으로 나누고, 각 저수 구간에 가중치를 그림 1과 같이 단조 증가시켜 Piecewise Convex Cost Function의 형태로 할당 되도록 하였다 (김승권 등, 1998). 이때, 각 저수지의 저수구간별로 할당된 가중치는 단조 증가되어 다르지만, 같은 유효 저수율에 해당하는 저수 구간에 할당된 가중치는 저수지 별로 모두 같게 설정하여, 병렬 저수지의 유효 저수율이 같아지도록 한다. 이와 같은 목적 함수를 기존의 CoMOM(Coordinated Multi-Reservoir Operatrion Model)(김승권, 1998, 2004; Kim et al., 2005)에 적용하여 저수량 할당 방안을 도출하여 보았다.

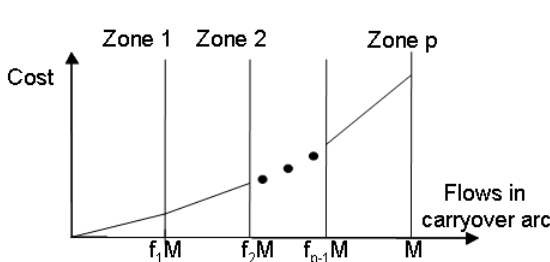


그림 1. Piecewise Linearized Cost Function

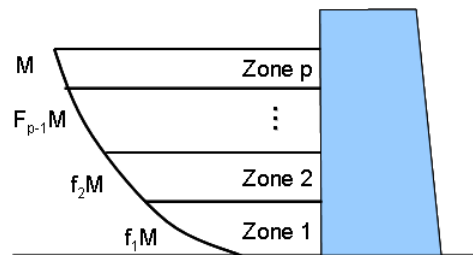


그림 2. 댐의 저수구간 구분

### 3.2 New York City Rule(NYC Rule)

NYC Rule을 활용한 저수량 할당 방안은 용수공급 측면에서 Sand(1984)에 의해서 선형 계획 모형으로 식 (6)~(7)과 같이 수립되었다. (Lund and Guzman, 1999)

$$\text{Min } z = EV\left(\sum_{i=1}^n h_i * \min(0, S_{fi} + CQ_i - K_i)\right) \quad (6)$$

subject to

$$\sum_{i=1}^n S_{fi} = \sum_{i=1}^n (S_{oi} + I_i) - D \quad (7)$$

이때, EV는 기대값(Expectation)이며, D는 하루 총 수요량이다. 본 연구에서는 식 (6), (7)을 적용하여 용수 공급 측면에서의 효과를 다른 방안들과 함께 비교하여 보았다. 이때, 확률 변수인 CQi는 과거 유입량 자료를 사용하였으며, 발생 확률은 모두 같게 설정하였다.

### 3.3 Space Rule

Space Rule을 활용하여 앞으로 더 많은 유입량이 예상 되는 저수지에 더 많은 저수 공간을 남기는 저수량 할당이 이루어지도록 선형 계획 모형의 저수지별 가중치를 식 (8)과 같이 적용하여 보았다.

$$w_i = \frac{K_i}{EV(CQ_i)} \quad \text{for all } i \quad (8)$$

이때, wi는 각 저수지의 저수 가중치이다. 이렇게 설정된 각 저수지별 저수 가중치를 3.1의 등가저수위 기법에서 적용된 각 저수지별 Piecewise Convex Cost Function에 곱하여 각 저수구간의 가중치를 설정한다. 이와 같은 가중치 설정방법을 CoMOM에 적용하여 미래 유입량과 저수용량을 고려한 저수량 균등 배분이 이루어지도록 하였다.

### 3.4 수정된 Space Rule

3.3에서 제시한 Space Rule의 활용 방안은 댐 직하류 하천 유지용수가 크고, 댐 안에서 취수가 이루어지고 있는 우리나라 댐의 저수량 할당에 활용하기에는 문제점이 있다. 우리나라의 경우 댐의 규모가 작은 반면, 하천에 방류 되어야 하는 양은 댐의 규모에 비하여 상대적으로 크다. 즉 댐 직하류 하천 유지용수가 크고, 댐 안에서 취수가 이루어지는 댐의 경우 반드시 방류해야 하는 물의 양이 많음에도 불구하고, 미래 유입량과 저수용량 만을 고려한 저수량 균등 배분을 고집하면 상대적으로 적은 저류량이 할당되어 용수 부족을 발생 시킬 수 있다. 그러므로 식 (9)와 같이 저수량 할당 방안을 수정하여 적용하여 보았다.

$$w_i = \frac{K_i}{EV(CQ_i) - CDin_i - CReq_i} \quad \text{for all } i \quad (9)$$

이때, CDin<sub>i</sub>는 각 저수지의 댐 내 취수량의 현재부터 분석기간 말까지의 총합이고, CReq<sub>i</sub>는 댐 직하류 하천 유지용수의 현재부터 분석기간 말까지의 총합이다. 이와 같이 댐내 취수량과 직하류 하천 유지용수를 유입량에서 빼주는 것은 이 물은 반드시 공급해야 하는 물로써, 저류 할당의 대상이 될 수 없기 때문이다. 이와 같은 가중치 설정방법을 CoMOM에 적용하여 그 효과를 분석해 보았다.

#### 4. 불확실성을 고려한 모의 운영을 통한 용수 공급 효과 분석

3절에서 제시한 4가지 방안을 미래 유입량을 모른다는 가정아래, 낙동강 수계의 저수지군 실시간 모의 연계운영에 적용하여 용수공급 측면에서의 효과를 분석해 보았다. 이를 위하여 3절에서 제시된 각각의 운영률을 최적 연계운영 모형에 적용하여 얻은 결과를 실제 실시간 연계운영에 적용한다는 가정을 세워 모의실험을 진행하였다. 원래 CoMOM 최적 연계운영은 시-공간적으로 최적 연계운영이 되도록 설계되어 있다. 그러나 본 실험에서는 미래 유입량은 알지 못한다는 조건하에서 병렬저수지의 저수량 할당에 따른 효과만을 측정하여 비교하고자 한다. 따라서 미래 유입량을 알지 못한다는 조건이 반영 되도록, 최적화 기간을 1개 기간(1일)만을 설정하여 수행 한 후, 그 결과로 도출된 기말 저수량을 다음날의 초기 저수량으로 설정하여 반복 수행하였다. 이때, 최적화 수행은 용수 공급 충족만을 단일 목적으로 하여, 하류 수요량을 만족시키고 남게 되는 물은 저수 상한을 넘지 않는 범위에서 모두 저류 하도록 하여 병렬저수지의 저수지 운영 시뮬레이션 효과를 비교하였다. 이와 같은 실험을 1966년~1996년까지 총 31개년의 유출량 자료를 이용하여 진행하였으며, 한국 수자원공사(2004)의 낙동강 수계 4개 다목적댐(안동, 임하, 합천, 남강)의 월별 용수공급 계획량의 총합을 진동 지점의 기본 수요로 하였다. 이때 이 수요량을 조금씩 증감 시켜가며, 95% 신뢰 수준 (31개년중 1개년의 용수 부족만을 허용함)을 만족하는 용수 공급량을 찾아 비교 하였다. 이와 같은 방법으로 진행된 용수공급 측면의 효과 분석 결과는 표 1과 같다. (참고로 기준이 된 월별 용수공급 계획량의 연간 총합계는  $2,690.3 \times 10^6 \text{m}^3/\text{년}$  이다. )

표 1. 구역의 현황

|                   | 95% 신뢰 수준의<br>용수 공급량<br>( $10^6 \text{m}^3/\text{년}$ ) | 총 월별 용수공급<br>계획량 대비 증감<br>( $10^6 \text{m}^3/\text{년}$ , %) | 발전량<br>(GWh) |
|-------------------|--|---|--------------|
| 1. 등가저수위          | 2,665.0  | ▽25.3 , ▽0.9%   | 401.2        |
| 2. NYC Rule       | 2,682.3  | ▽8.0 , ▽0.3%  | 403.5        |
| 3. Space Rule     | 2,732.2  | 41.9 , 1.5%   | 402.3        |
| 4. 수정된 Space Rule | 2,874.4  | 184.1 , 6.8%  | 405.0        |

용수공급 측면에서의 각 방안별 효과는 수정된 Space Rule이 가장 좋은 결과를 보여줌을 알 수 있고, HEC-5에서 병렬저수지 운영시 활용되는 등가 저수위가 가장 열등한 결과를 보여준다. 이는 미래 유입량의 불확실성도 고려해야 하고, 댐 내 취수와 댐 직 하류 유지용수 등 수계 내 용수공급 특성을 잘 반영할 수 있는, 보다 유연한 병렬저수지 저수량 할당 방안이 필요함을 보여준다.

#### 5. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구에서는 병렬로 구성된 저수지군 연계 운영을 위한 저수량 할당 방안으로 기존 문헌 등에서 제시된 NYC Rule, Space Rule, 등가 저수위 등을 종합하여 제시하고, 각 운영방안의 용수공급 측면에서 효과를 비교 분석해 보았다. 그 결과, 댐 내 취수와 댐 직 하류 유지용수 등을 반영하여 수정한 Space Rule의 경우가 가장 좋은 결과를 보여주었다. 따라서 실시간 운영, 최적화 모형의 가중치 설정이나 유역 시뮬레이션 모형의 저수지 운영방안 설정 시 수정된 Space Rule을 적용한다면 현실적으로 더 좋은 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대 된다.

한편 본 연구에서는 일차적으로 95% 신뢰 수준에서의 가능한 용수 공급량만을 평가하였지만, 용수 부족의 빈도, 부족심도, 복원도 등의 기준을 적용한 평가도 진행되어야 각 방안의 효과를 정확히 판단할 수 있을 것이며, 향후 연구로 보완될 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 1-6-2)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. 김승권, 박영준(1998). 댐군의 연계운영을위한 수학적모형, 한국수자원학회논문집, 31(6), pp. 779-793.
2. 김승권(2004). 낙동강수계 일별 최적운영모형 개발 보고서, 한국수자원공사
2. 한국수자원공사(2004). 다목적댐 운영 실무 편람
4. Bower, B.T., M.M. Hufschmidt, and W.W. Reedy (1966), "Operating Procedures: Their Role in the Design of Water-Resource Systems by Simulation Analyses," in A. Maass, et al., Design of Water-Resource Systems, Harvard University Press, pp. 443-458.
3. Clark. (1950). New York control curves, Journal of American Water Works Association, 42(9), pp. 823-827.
6. HEC (1998), HEC-5 User's Manual Version 8.0, U.S Army Corps Engineers
5. Kim, S. K., Lee, Y. D., Kim, J. H., and Ko, I. H.(2005). A multiple objective mathematical model for daily coordinated multi-reservoir operation, Water Science and Technology:water supply, 5(3-4), pp 81-88.
7. Lund and Guzman. (1999). Some Derived Operating Rules for Reservoirs in Series or in Parallel, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 125, No. 3, pp. 143-153
8. Sand, G.M. (1984), An Analytical Investigation of Operating Policies for Water-Supply Reservoirs in Parallel, Ph.D. Dissertation, Cornell University, Ithaca, NY.