

NYC-Space Allocation Rule을 이용한 병렬저수지 연계운영

박 기 범 · 이 순 탁*

안동과학대학 건설정보과 · 영남대학교 토목도시환경공학부
(2005년 3월 29일 접수; 2005년 6월 21일 채택)

Parallel reservoirs system operation using NYC-Space Allocation-Rule

Ki-Bum Park and Soon-Tak Lee*

Department of Construction Information, Andong Science College, Andong 760-820, Korea

*School of Civil, Urban and Environment Engineering, Yeungnam University, Gyongsan 712-749, Korea

(Manuscript received 29 March, 2005; accepted 21 June, 2005)

In this study, an optimization technique was developed from the application of Allocation Rule. Average Allocation coefficients of the Andong and Imha dam compare constant water supply condition with vary water supply condition that are above the contribute ratio 67%~50% the Andong dam in Rule(A)~Rule(C). In the Refill Season, Andong dam water supply contribution is higher than Imha dam at the Control point water supply. In the Allocation analysis results, Rule(A) is calculated storage ratio because Andong dam contribute to Control point larger than Imha dam which Andong dam storage is larger than Imha dam storage. Rule(B) calculated sum of the storage and inflow ratio for Andong dam and Imha dam, as Andong dam contribution is higher than Imha dam. Rule(C) calculated that sum of storage, inflow and water supply is divided average storage ratio, as the best results of the Allocation coefficients and water supply capacity. The results of storage analysis is larger vary water supply condition than constant water supply condition and the results of water supply analysis is larger vary water supply condition than constant water supply condition. Water supply deficit is decrease 30% for vary water supply condition.

Key Words : Reservoir, Allocation Rule, Optimization, Water supply

1. 서 론

이수목적의 저수지 운영방안에서 용수부족발생의 최소화를 위하여 다양한 기법들이 시도되고 있지만 저수지의 배열상태, 유역의 유출특성 등에 적합하게 적용되지는 못하고 있다. 저수지의 최적운영이란 용수공급의 측면에서 볼 때 용수공급의 안정성을 최대화 시켜주는 것이라 할 수 있다. 용수공급을 최대화 혹은 용수 부족발생을 최소화 하기 위해서는 풍수기에 저류한 물을 최대한 활용하여야 하며, 또한 풍수기가 끝난 보충기간(refill season)인 10월에서 다음해 6월까지 무효방류량을 최소화하여 저류량을

확보하면서 용수공급을 하여야 한다. 그러나 풍수기 이외의 기간 동안에는 특별히 유입량이 크지 않아 저수지의 저류량의 확보가 쉽지 않으며 이 기간 동안의 저수지시스템의 효율적인 관리가 필요하다.

여기서 수자원의 효율적 관리, 즉 관리능력 향상 측면에서 구체적이고도 유역의 저수지 배열의 특성에 맞는 저수지의 연계운영 기법이 요구된다. 저수지 운영관리기법에서 무효방류량을 최소화하고 한정된 물을 수자원의 배분을 합리화할 수 있는 저수지 관리 시스템의 방법론적 완성은 수자원의 공급과 수요관리측면에서 중요한 과제라고 할 수 있다.

병렬저수지의 연계운영에 관한 연구로서 Clark (1950)¹⁾이 New York 시의 용수공급 시스템에서 각 유역의 저류량을 모든 기간에 대해 동일한 실패 확률을 가지도록 시스템을 운영 하였다. Sand(1984)²⁾와 Johnson(1991)³⁾ 등은 New York City에 적용한

Corresponding Author : Ki-Bum Park, Department of Construction Information, Andong Science College, Andong 760-820, Korea
Phone: +82-53-326-0526
E-mail: pkb5032@naver.com

것이 NYC(New York City)Rule로 New York City의 용수공급 문제를 적용하였다. Johnson(1991)³⁾ 등은 저수지시스템의 운영에 있어 Heuristic operating policies를 적용하여 저수지 제약조건과 보충기간(refill season)의 저수량 목적에 적용하여 발전함수를 최적화 하였으며, Lund(1999)⁴⁾ 등은 직렬저수지와 병렬저수지의 운영방안 도출에 관한 연구로서 Hedging Rule과 NYC-Space Rule을 적용하여 분석하였다. 박기범(2004)⁵⁾ 등은 가뭄기간의 저수지 최적 운영에서 제약조건의 변화에 따라 용수공급의 능력을 해석하고 신뢰도 평가를 실시하였다. Ming-Yen Tu(2002)⁶⁾ 는 가뭄기간에 대하여 Hedging Rule을 이용한 저수지 용수배분 문제를 최적화 하였다. 따라서, 저수지 시스템의 특성에 맞는 운영방안의 도입과 풍수기 이외의 기간의 최적의 저수지 운영방안을 도입하여 용수확보의 안정성을 높이는 필요성이 더욱 증가되고 있다.

본 연구에서는 낙동강 수계의 병렬저수지 시스템으로 구성된 안동댐과 임하댐에 NYC-Space Allocation Rule을 이용한 시스템을 구성하여 7,8,9월의 풍수기에 최대한 물을 저류하고 보충기간(refill season, 10월~6월)의 저수지의 용수공급량의 부족분을 최소화하고, 저류량을 최대화 할 수 있는 방안을 제시하였다.

2. 기본이론

2.1. 연구방법

연구방법으로는 먼저 한국수자원공사의 수자원관리 종합정보 시스템(<http://wamis.or.kr>)⁷⁾의 안동댐과 임하댐의 건설이후의 유입량자료를 수집하여 분석하였다. 다음으로 각 월에 대한 유입량의 통계적인 특성을 분석하였으며, 보충기간(refill season)의 유입량계열의 통계적인 특성을 분석하였다.

안동댐과 임하댐의 연계운영을 위하여 임하댐이 건설된 1992부터 2003년까지 유입량 자료를 이용하여 NYC-Space Allocation Rule 모형을 구축하였으며, 방류량의 결정과정에 Revelle(1999)⁸⁾가 제안한 용수공급 할당방법을 적용하여 월별 용수공급량을 일정하게 할 경우와 월별용수공급량의 변화를 고려한 경우에 대하여 저류량의 변화와 용수공급의 분석을 수행하였다.

2.2. NYC-Space Rule의 기본이론

일반적인 하천유역의 수자원시스템에서 저수지운영 Rule의 적용에 있어서는 방류량과 용수요구량을 충족시키는 데 목적을 두고 운영을 한다.

Hashimoto(1982)⁹⁾ 등은 저수지 운영에 있어서 표준운영방안이 목적함수가 전체 공급부족분을 최소화하는 목적함수로 구성되는 경우에 최적해에 해당

한다고 결론지은 바 있으나, Stedinger(1984)¹⁰⁾은 이런 표준방안은 물부족의 상황이 발생하는 경우 또는 물부족이 예상되는 경우에 적절한 운영체계를 제공하지 못한다는 점과 여유수량이 존재하는 경우의 적절한 활용절차를 제공하지 못한다는 단점을 제시하였다.

수자원시스템에서 저수지의 저류량과 방류량에 관한 배분은 저수지의 목적과 시간 그리고 저수지의 상태에 따라 결정된다. 저수지의 배열상태에 따른 방류결정에 관한 운영 Rule은 Hedging Rule과 Space Rule로서 이중 직렬저수지 시스템에서 보다 큰 물부족의 가능성을 방지하기 위하여 현재의 작은 부족을 감수하는 방식이 Hedging Rule이다. 동일한 목적을 가지는 병렬저수지군의 경우에 방류량을 배분하는 운영 Rule을 Space Rule이라 한다.

NYC-Space Rule은 예상되는 최소한의 부족에서 직접적인 양의 부족보다는 확률적인 부족을 이용한다. 풍수기가 아닌 기간 즉 보충기간(refill season)의 각 저수지에서 무효방류량을 최소화하고 저류량의 확보를 최대화 하였을 때, 예상되는 용수부족을 최소화 할 수 있다.

다음 Fig. 1에서 등고선과 같은 것은 시스템의 목적함수이다. 2개의 저수지의 제약조건에서 만족되는 용수공급이라 할 수 있다. 각각의 저수지의 저류용량에서 연직선과 수평선은 상한경계와 하한경계이며 빗금친 부분이 두 개의 저수지가 공유되는 부분이다. 발전, 저수지방류와 최소용량제약조건이 설정되어 있지 않다면 Fig. 1의 점 A에서 NYC-Space Rule에 따라 균형을 맞출 것이다. 만일 2번째 저수지의 초기저류량에서 저수지 제약조건이 너무 낮을 경우 저수지 2의 용수공급계획량 S_2^* 는 오른쪽으로 이동될 것이다. Fig. 2에서는 발전제약조건이 추가된 경우이다. Fig. 1의 NYC-Space Rule 해결과정에서 Fig. 2에서는 점 A는 더 이상 Feasible Solution이 아니다. Fig. 2에서 점 C가 NYC-Space Rule에 의한 최대 저류량이 된다. 점 B는 Feasible set에서 목적함수와 절충되는 곳이다. 점 C는 저류량 $S_1 + S_2$ 가 최대저류량 V_{max} 가 되는 점이다. $V_{max} + S_1 - S_2$ 는 NYC-Space Rule에 근접하도록 저수지 방류량을 유지한다. 만약 Fig. 2의 점 D에서 저수지의 저류량이 에너지 경계조건을 만족한다면 계속 방류를 할 것이다.

본 연구에서 목적함수(Objective Function)에서 고려된 사항은 다음과 같다.

- 1) 보충기간(refill season) 기간동안의 하류지역 용수부족량의 최소화
- 2) 병렬저수지시스템의 저류량의 최대화

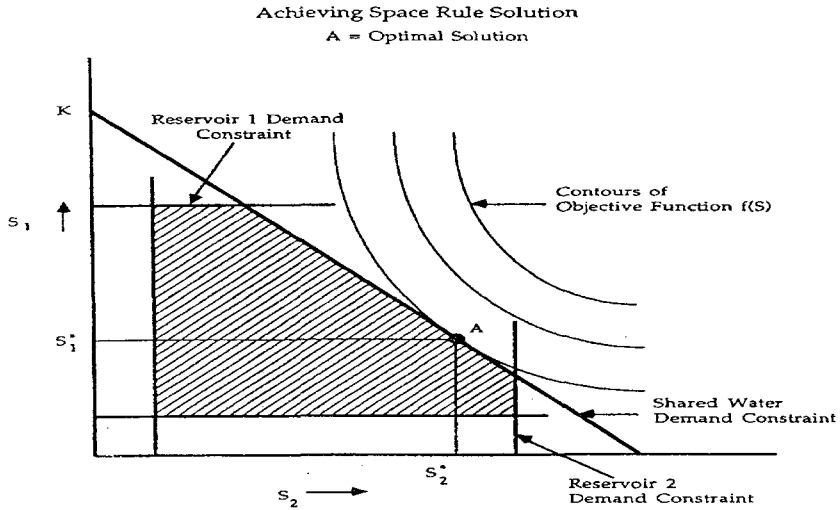


Fig. 1. Achieve NYC-Space Rule targets when the objective $f(S)$ is maximized subject to constraints on the storage S_1 and S_2 .

Tradeoff Between Maximizing Storage and Space-Rule Balancing
 A = old space rule solution (infeasible)
 B = compromise solution
 C = minimum release solution
 D = new feasible space rule solution

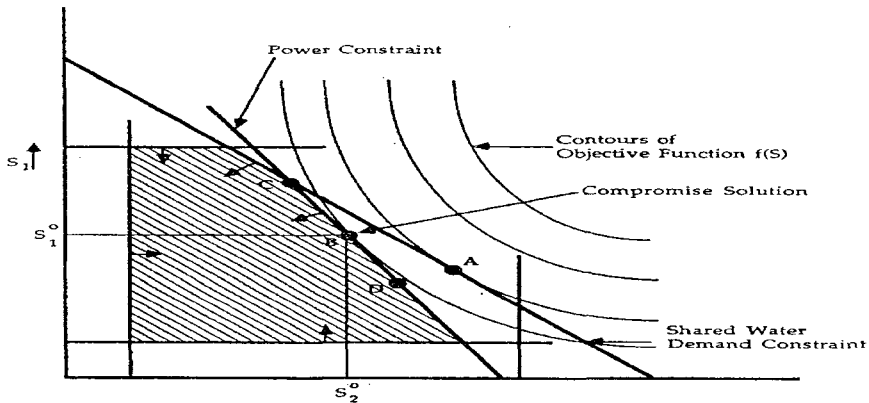


Fig. 2. Tradeoff between maximizing the volume of water in storage and balancing to NYC-Space Rule targets when the objective $f(S)$ is maximized subject to constraints on the storage S_1 and S_2 .

3) 7,8,9월 용수요구량의 100% 충족.

병렬저수지 시스템에서 각각의 저수지에서 얼마만큼을 방류할 것인가, 지속적인 방류량 등이 기본적인 문제이다. 병렬저수지 시스템 문제의 구성에 있어서 각각 저수지의 방류량이 용수부족을 발생하지 않도록 하여 연간 용수부족량을 최소화 하는 것이다. 저수지는 저류상태에 따라 최악의 유입량이 발생한 경우를 고려하여 현재 저수지 상태에서 최소의 용수부족량이 발생하도록 결정하여 장래의 저수지 상태를 예측할 수도 있다.

저수지 시스템의 용수부족량을 최소화 하는 방법에는 두 가지 다른 개념과 접근방법으로 분류할 수 있다.

첫 번째로 동일 기간의 조절점에서 각 저수지에서 공급한 양의 비율에 따라 할당할 수 있으며, 각 월의 공급량 비율에 따라 각월에 대해 할당비율이 계산되어 질 수 있다.

두 번째로 저수지 시스템의 상태에 영향을 주는 변수들, 즉 예상되는 유입량과 저수량 상태와 다른 저수지의 예상되는 유입량과 저수량 상태의 비율에

따라 공급량 할당비율을 결정할 수 있다.

LP 모델에서 저수지 시스템의 공급량 최대화를 수식화하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Max } z &= q_M \\ \text{Subject To} \\ s_{1t} &= s_{1t-1} + i_{1t} - w_{1t} - q_{1k} \\ t &= 1, 2, \dots, n; \\ k &= t - 12[(t-1)/2] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} s_{1t} &\leq c_1 \\ t &= 1, 2, \dots, n; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} s_{2t} &= s_{2t-1} + i_{2t} - w_{2t} - q_{2k} \\ t &= 1, 2, \dots, n; \\ k &= t - 12[(t-1)/2] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} s_{2t} &\leq c_2 \\ t &= 1, 2, \dots, n; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} s_{3t} &= s_{3t-1} + i_{3t} - w_{3t} - q_{3k} \\ t &= 1, 2, \dots, n; \\ k &= t - 12[(t-1)/2] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} s_{3t} &\leq c_3 \\ t &= 1, 2, \dots, n; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} q_{1k} + q_{2k} + q_{3k} &= q_M \\ k &= 1, 2, \dots, 12 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 모든 변수들과 제약조건들은 0보다는 크거나 같다. c_1, c_2, c_3 : 각 저수지의 저류용량, i_{1t}, i_{2t}, i_{3t} : 유입량, q_{1k}, q_{2k}, q_{3k} : 용수공급량, w_{1t}, w_{2t}, w_{3t} : 용수공급량 이외의 방류량, s_{1k}, s_{2k}, s_{3k} : 각 저수지의 t 월말의 저수용량, q_M : 하류조절점의 용수공급량의 합이다.

식(1)과 식(3), 식(5)는 각 저수지의 물수지방정식이며, 제약조건 식(2), 식(4) 그리고 식(6)은 저류량 제약조건이다. 식(7)은 각 k 월의 저수지 용수요구량의 합계이다.

저수지 시스템의 연계운영에서 저수지의 용수부족량을 최소화하는 방법 중 하나로서 현재의 저수지 상태를 고려하여 방류량 결정을 하는 것이다.

2.3. Allocation Rule의 기본이론

공급량 할당비율의 산정에 있어 NYC-Space Rule에 대해 저수지의 요구되는 방류량의 할당을 저수지 공간의 비율에 따라 혹은 유입량의 예측이 가능하다면 유입량의 비율을 고려하여 보충기간(refill

season)의 순환에 따라 모든 저수지의 방류량을 결정하는 것으로 설명되어 있다. t 기간 말기에 대한 저수지 i 의 공유공간(free volume)은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$v_{it} = c_i - (s_{it-1} + ip_{it} - x_{it}) \quad (8)$$

여기서, ip_{it} : t 월의 저수지 i 의 계획유입량, v_{it} : 저수지 i 의 t 기간 말의 공유공간(free volume), c_i : 저수지 i 의 총저류량, x_{it} : t 월의 저수지 i 의 계산된 공급량(기여량), s_{it} : t 기간 말의 저수지 i 의 저류량.

저수지 i 에 대한 공유공간(free volume)의 저수지 시스템의 전체 용량은 다음과 같다.

$$\frac{[c_i - (s_{t-1} + ip_t - x_t)]}{\sum_{i=1}^2 [c_i - (s_{t-1} + ip_t - x_t)]} \quad (9)$$

그리고

$$a = \frac{ir_i}{\sum_{i=1}^3 ir_k} \quad (10)$$

따라서 공급량의 공유공간(free volume)의 비율은 다음과 같다.

$$\frac{[c_i - (s_{t-1} + ip_t - x_t)]}{\sum_{i=1}^2 [c_i - (s_{t-1} + ip_t - x_t)]} = a_t \quad (11)$$

병렬저수지 2개의 총 공급량의 합계는 다음과 같다

$$\sum_{i=1}^2 x = T \quad (12)$$

공유공간(free volume)의 비율은 다음과 같이 된다.

$$\frac{[c_i - (s_{t-1} + ip_t - x_t)]}{[\sum_{i=1}^2 [c_i - (s_{t-1} + ip_t - x_t)] + T]} = a_t \quad (13)$$

분모의 항은 기지의 값들이므로 다음과 같이 상수로 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=1}^2 (c_i - s_{t-1} + ip_t) = N \quad (14)$$

x 는 다음과 같이 풀이할 수 있다

$$c_i - (s_{t-1} + ip_t - x_t) = a_t(N + T) \quad (15)$$

여기서 $(N+T)$ 는 방류량과 손실량 그리고 초과 방류량의 합계이다.

t 월에 대한 저수지 i 의 기여도는 다음과 같다.

$$x_t = a_i(N+T) - c_i + s_{t-1} + ip_t \quad i=1,2 \quad (16)$$

여기서 위식(8)~(16)에 사용된 기호들은 ip_{it} : t 월의 저수지 i 의 계획유입량, ir_i : 저수지 i 의 보충기간(refill season) 잔여기간의 예측유입량, a : 저수지 i 에 대한 t 월의 용수요구량에 대한 할당계수, x_{it} : t 월의 저수지 i 의 계산된 기여량, T : 저수지 시스템의 검증된 방류량, v_{it} : 공유공간(free volume) 저수지 i t 기간 말의 공유공간(free volume)이다.

식(15)와 같은 경우는 시스템의 운영기간동안 여수로 방류량을 최소화하였다. T 는 병렬저수지 시스템의 조절점에서의 할당식을 적용하여 추정할 수 있다.

각각의 저수지의 월별 기여도를 산정하는 방법으로는 저수지 i 로부터의 공급량할당이 저수지 i 의 저류량의 비율로 나타낼 수 있다.

Rule (A)

$$x_t = \left[\frac{s_{t-1}}{\sum_{i=1}^2 s_{t-1}} \right] \times T \quad i=1,2 \quad (17)$$

식 (17)과 같은 Allocation Rule의 경우는 저수지의 현재의 유입량을 고려하지 않아 전체용량이 고려되지 않았으며 식 (18)의 Allocation Rule과 같이 유입량의 용량까지 고려하였을 경우는 다음과 같다.

Rule (B)

$$x_t = \left[\frac{s_{t-1} + ip}{\sum_{i=1}^2 (s_{t-1} + ip)} \right] \times T \quad i=1,2 \quad (18)$$

식(18) Allocation Rule에서는 저수량과 t 월의 유입량과 저수량을 고려하여 할당합수를 산정 할 수 있다.

마지막으로 저수량을 이용하여 월별 기여도의 산정에서 현재의 유입량과 저수용량과 총용량의 비로 나타낼 수 있다.

Rule (C)

$$x_t = \left[\frac{(s_{t-1} + ip_i)/c_i}{\sum_{i=1}^2 (s_{t-1} + ip_i)/c_i} \right] \times T \quad i=1,2 \quad (19)$$

저수지시스템의 공급량 비율은 t 월에 대한 저수지 i 로부터 저수지의 총용량과 유입량을 포함한 저수지저류상태의 비율에 의해 산정될 수 있다.

식(17)~식(19)의 Allocation Rule(A),(B),(C)는 저수지 시스템의 T 는 저수지 시스템의 운영과정에서 구해질 수 있다. 여기에 Allocation Rule(A)는 다음과 같은 식(20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_t = s_{t-1} + i_t - x_t \quad 0 \leq s_{t-1} + i_t - x_t \leq c_i \quad (20)$$

$$s = c_i \quad c_i < s_{t-1} + i_t - x_t \quad (21)$$

$$s = [\in \text{admissible/stop}] \quad s_{t-1} + i_t - x_t < 0 \quad (22)$$

시스템의 최대공급량을 결정하는데 있어서 먼저 T 의 값을 결정하여 한다. T 는 각각의 저수지의 분리된 공급량보다는 크거나 같아야 한다. 그리고 나서 저수지 시스템의 계획기간의 운영이 될 것이다. T 의 값을 가정하면 T 는 식 (20)과 식(22)에 따라서 점차 증가하여 저수지의 저류량이 (-)가 될 경우에 다른 저수지에서 보다 많은 방류를 하도록 유도할 것이다.

3. 적용분석 및 결과

3.1. 대상유역의 개요

기존댐 용수공급능력평가(낙동강 수계, 건설교통부, 한국수자원공사, 1998)¹¹⁾에서 조사한 자료에 의하면, 안동댐의 용수공급능력은 925 10⁶m³/년으로 조사되었으며,임하댐은 497 10⁶m³/년으로 조사되었다. Fig. 3은 낙동강에 위치한 안동댐과 임하댐을 나타내었다.

3.2. 모형의 구성

본 연구에서 NYC-Space Rule 방법에 따른 병렬저수지 연계운영방안(Lund, 1999)에 Revell(1999)가 제안한 공급량 할당방식을 추가하여 NYC-Space Allocation Rule 모델을 구성하여 분석을 실시하였다.

유입량자료의 통계분석을 위하여 안동댐은 1977~2003년까지의 유입량자료를 분석하였으며, 임하댐은 1992~2003년까지의 유입량자료를 분석한 결과 안동댐의 월평균유입량은 32.41 m³/s이었으며, 임하댐의 경우는 23.70 m³/s이었다. 그리고 10월부터 6월까지의 Refill Season 유입량의 평균이 안동댐의 경우 16.95 m³/s이었으며, 임하댐의 경우 11.05 m³/s이었다. 임하댐의 유입량에 대한 통계분석결과에서는 안동댐과 같이 8월에 가장 많은 유입량이 유입되

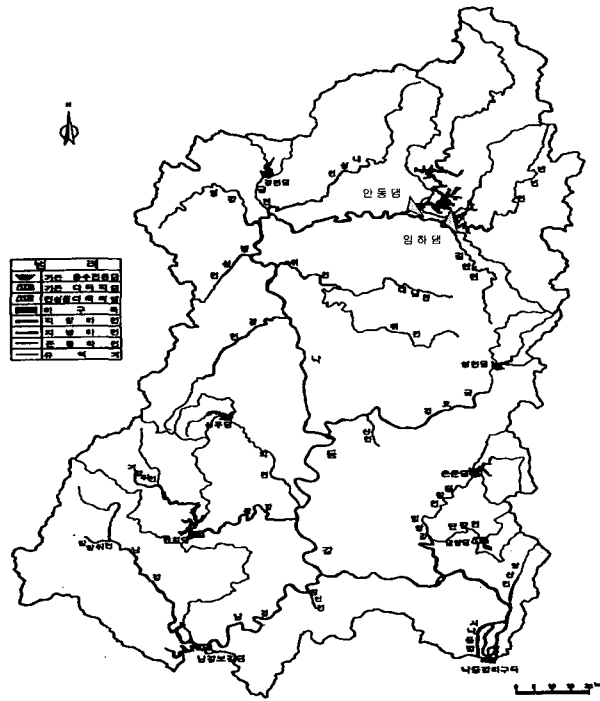


Fig. 3. Research Area.

는 것으로 분석되었으며, 풍수기인 7,8,9월에 총유입량의 61%, 65%정도가 유입되는 것으로 안동댐보다 임하댐이 풍수기에 유입되는 비중이 큰 것으로 분석되었다. 안동댐과 임하댐의 유입량에 대한 통계특성치의 분석결과는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

다음으로 NYC-Space Allocation Rule을 적용하기 위하여 제약조건을 설정은 다음과 같다. 안동댐과 임하댐에 적용된 초기조건은 초기저류량을 상시만수량으로 하였으며, 하한제약조건은 사수량으로 하였다. 안동댐과 임하댐의 상한 제약조건은 상시만

수량으로 하여 상시만수량이상은 방류가 되도록 하였다.

안동댐과 임하댐의 방류량 제약조건으로는 방류량은 항상 0보다 커야하는 것으로 설정하였으며 7,8,9월은 용수요구량을 100% 공급하는 것으로 설정하였다.

안동댐과 임하댐의 용수공급계획량이 연간 용수공급계획량 $926 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{년}$ $497 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{년}$ 을 매월 일정한 양으로 공급할 경우 즉, 안동댐과 임하댐의 용수요구량을 유지용수를 포함한 각각 $29.16 \text{ m}^3/\text{s}$, 15.76

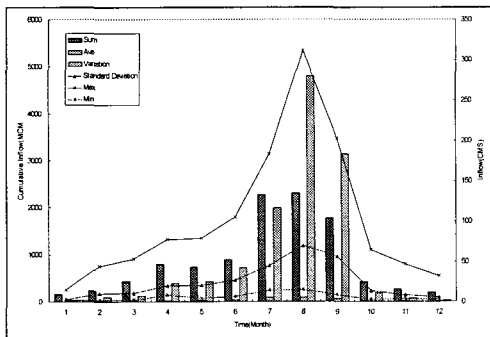


Fig. 4. Statistic characteristics of Andong Dam inflow.

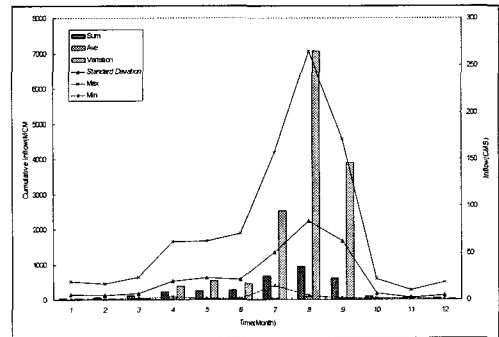


Fig. 5. Statistic characteristics of Imha Dam inflow.

NYC-Space Allocation Rule을 이용한 병렬저수지 연계운영

m³/s로 하였다. 다음으로 안동댐과 임하댐의 월별 용수공급량의 변화를 고려한 경우 NYC-Space Allocation Rule에 의한 저수지 연계운영방안 중 Rule (A), Rule(B), Rule(C)에 대하여 각 월별 용수공급량을 계절적 변화를 고려하여 분석을 실시하였다.

안동댐과 임하댐의 월별 용수변화량을 살펴보면 Table 1과 같이 안동댐의 경우 8월에 농업용수가 최대가 되면서 용수공급계획량도 최대 50.2m³/s가 되며 농업용수공급계획이 없는 경우 19.9m³/s이다. 임하댐의 경우 8월에 16.6m³/s로 최대가 되나 농업용수공급계획이 있는 경우와 없는 경우의 차가 비교적 적게 나타났다.

안동댐과 임하댐의 하류에 대한 용수공급량의 할당비율을 산정하는 allocation 계수의 산정결과 Table 2에 나타난 바와 같이 월별 공급량이 일정한 경우 NYC-Space Allocation Rule(A), Rule(B), Rule(C)의 산정결과, Rule(A)의 경우 안동댐이 0.670으로 분석되었으며 임하댐이 0.288로 안동댐이 하류 Control Point에서 용수공급의 기여도가 큰 것으로 나타났다. 보충기간(refill season)의 경우 안동댐이 0.663, 임하댐이 0.282로 분석되어 보충기간(refill season)에 안동댐의 용수공급의 기여도가 큰 것으로 분석되었다.

Rule(B)의 경우 안동댐이 0.692로 분석되었으며,

Table 1. Design Water Supply of Multipurpose Dams

(Unit : m³/s)

Months	Andong Dam				Imha Dam			
	D&I	A	C	SUM	D&I	A	C	SUM
1	14.3	0.0	5.6	19.9	8.5	0.0	6.8	15.3
2	14.3	0.0	5.6	19.9	8.5	0.0	6.8	15.3
3	14.3	0.0	5.6	19.9	8.5	0.0	6.8	15.3
4	14.3	0.9	5.6	20.8	8.5	0.1	6.8	15.4
5	14.3	13.8	5.6	33.7	8.5	0.5	6.8	15.8
6	14.3	29.4	5.6	49.3	8.5	1.2	6.8	16.5
7	14.3	20.6	5.6	40.5	8.5	0.9	6.8	16.2
8	14.3	30.3	5.6	50.2	8.5	1.3	6.8	16.6
9	14.3	16.5	5.6	36.4	8.5	0.7	6.8	16.0
10	14.3	2.1	5.6	22.0	8.5	0.1	6.8	15.4
11	14.3	0.0	5.6	19.9	8.5	0.0	6.8	15.3
12	14.3	0.0	5.6	19.9	8.5	0.0	6.8	15.3
Average	14.3	9.5	5.6	29.4	8.5	0.4	6.8	15.7

D&I : Domestic and Industrial A : Agriculture C : Conservation Flow

Table 2. NYC-Allocation Coefficients

Months	Constant Water Demand						Variation Water Demand					
	Andong Dam			Imha Dam			Andong Dam			Imha Dam		
	Rule (A)	Rule (B)	Rule (C)	Rule (A)	Rule (B)	Rule (C)	Rule (A)	Rule (B)	Rule (C)	Rule (A)	Rule (B)	Rule (C)
1	0.646	0.747	0.522	0.271	0.248	0.478	0.652	0.703	0.522	0.265	0.297	0.478
2	0.646	0.746	0.522	0.271	0.248	0.478	0.654	0.702	0.522	0.263	0.298	0.478
3	0.647	0.739	0.514	0.269	0.253	0.486	0.656	0.695	0.514	0.261	0.305	0.486
4	0.646	0.748	0.531	0.271	0.246	0.469	0.659	0.710	0.531	0.258	0.290	0.469
5	0.642	0.708	0.551	0.275	0.289	0.449	0.656	0.725	0.551	0.260	0.275	0.449
6	0.639	0.634	0.532	0.277	0.364	0.468	0.651	0.709	0.532	0.265	0.291	0.468
7	0.688	0.612	0.472	0.312	0.388	0.528	0.690	0.663	0.472	0.310	0.337	0.528
8	0.689	0.561	0.461	0.311	0.439	0.539	0.685	0.652	0.461	0.315	0.348	0.539
9	0.697	0.624	0.466	0.303	0.376	0.534	0.691	0.658	0.466	0.309	0.342	0.534
10	0.697	0.704	0.478	0.303	0.296	0.522	0.691	0.665	0.478	0.309	0.335	0.522
11	0.701	0.731	0.497	0.299	0.269	0.503	0.696	0.681	0.497	0.304	0.319	0.503
12	0.701	0.746	0.509	0.299	0.254	0.491	0.702	0.693	0.509	0.298	0.307	0.491
Average	0.670	0.692	0.505	0.288	0.306	0.495	0.674	0.688	0.505	0.285	0.312	0.495
Refill season Ave.	0.663	0.722	0.517	0.282	0.274	0.483	0.669	0.698	0.517	0.276	0.302	0.483

임하댐이 0.306로 안동댐이 하루 Control Point에서 용수공급의 기여도가 큰 것으로 나타났다. 보충기간(refill season)의 경우 안동댐이 0.722, 임하댐이 0.274로 분석되어 보충기간(refill season)에 안동댐의 용수공급의 기여도가 Rule(A)보다 더 증가되는 것으로 분석되었다. Rule(C)의 경우 안동댐이 0.505로 분석되었으며 임하댐이 0.495 안동댐이 하루 Control Point에서 용수공급의 기여도가 균형을 이루는 것으로 나타났다. 보충기간(refill season)의 경우 안동댐이 0.517, 임하댐이 0.483으로 분석되어 보충기간(refill season)에 안동댐의 용수공급의 기여도가 더 증가되는 것으로 분석되었다.

월별공급량의 변화를 고려한 경우 NYC-Space Allocation Rule(A), Rule(B), Rule(C)의 산정결과, Rule(A)의 경우 안동댐이 0.674로 분석되었으며 임하댐이 0.285로 안동댐이 하루 Control Point에서 용수공급의 기여도가 큰 것으로 나타났다. 보충기간(refill season)의 경우 안동댐이 0.669, 임하댐이 0.276으로 분석되어 보충기간(refill season)에 안동댐의 용수공급의 기여도가 큰 것으로 분석되었다. Rule(B)의 경우 안동댐이 0.688로 분석되었으며, 임하댐이 0.312로 안동댐이 하루 Control Point에서 용수공급의 기여도가 큰 것으로 나타났다.

보충기간(refill season)의 경우 안동댐이 0.698, 임하댐이 0.302로 분석되어 보충기간(refill season)에 안동댐의 용수공급의 기여도가 Rule(A)보다 더 증가되는 것으로 분석되었다. Rule(C)의 경우 안동댐이 0.505로 분석되었다.

임하댐이 0.495 안동댐이 하루 Control Point에서 용수공급의 기여도가 균형을 이루는 것으로 나타났다. 보충기간(refill season)의 경우 안동댐이 0.517, 임하댐이 0.483으로 분석되어 보충기간(refill sea-

son)에 안동댐의 용수공급의 기여도가 더 증가되는 것으로 분석되었다. 안동댐과 임하댐의 Allocation 계수는 Table 2와 같으며, 분석기간 1992~2003년 동안의 Allocation 계수의 변화는 Fig. 6~Fig. 7과 같다.

3.3. 모델의 분석결과

NYC-Allocation Rule(A), (B), (C)에 따른 안동댐과 임하댐의 연계운영분석을 한 결과 Rule(A)의 경우 안동댐의 평균 저류량은 $773.57 \times 10^6 \text{m}^3$ 이며, 임하댐의 평균 저류량은 $351.15 \times 10^6 \text{m}^3$ 으로 분석되었다. Rule(B)의 경우 안동댐의 평균 저류량은 $773.35 \times 10^6 \text{m}^3$ 이며, 임하댐의 평균 저류량은 $350.10 \times 10^6 \text{m}^3$ 으로 분석되었다. Rule(C)의 경우 안동댐의 평균 저류량은 $756.34 \times 10^6 \text{m}^3$ 이며, 임하댐의 평균 저류량은 $346.27 \times 10^6 \text{m}^3$ 으로 분석되었다.

월별 용수공급량의 변화를 고려하여 NYC-Allocation Rule(A), (B), (C)에 따른 안동댐과 임하댐의 연계운영분석을 한 결과 Rule(A)의 경우 안동댐의 평균 저류량은 $802.84 \times 10^6 \text{m}^3$ 이며, 임하댐의 평균 저류량은 $349.99 \times 10^6 \text{m}^3$ 으로 분석되었다. Rule(B)의 경우 안동댐의 평균 저류량은 $805.42 \times 10^6 \text{m}^3$ 이며, 임하댐의 평균 저류량은 $352.88 \times 10^6 \text{m}^3$ 으로 분석되었다. Rule(C)의 경우 안동댐의 평균 저류량은 $788.20 \times 10^6 \text{m}^3$ 이며, 임하댐의 평균 저류량은 $347.61 \times 10^6 \text{m}^3$ 으로 분석되었다.

Table 3은 NYC-Space Allocation Rule에 의한 안동댐과 임하댐의 연계운영에 의해 1992~2003년까지 용수공급 분석한 결과 저류량에 대한 통계분석결과를 정리하였다.

Table 4에 정리한 바와 같이 NYC-Allocation Rule(A), (B), (C)에 따른 안동댐과 임하댐의 용수공급 분석결과를 살펴보면 Rule(A)에서 안동댐의 용수부족횟수는 7회로 나타났으며, 임하댐은 12회,

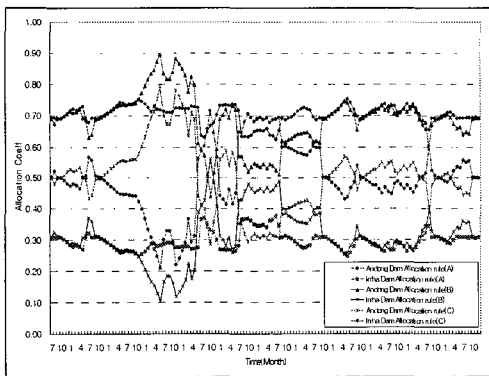


Fig. 6. Comparison of Allocation Coefficients. (Constant Water Demand)

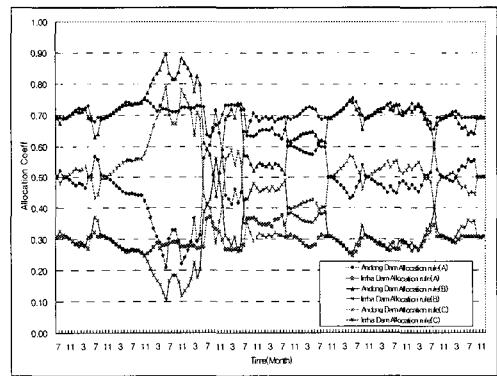


Fig. 7. Comparison of Allocation Coefficients. (Variation Water Demand)

Table 3. Comparison of Storage Statistics

Classification		Constant Water Demand			Variation Water Demand		
		Rule(A)	Rule(B)	Rule(C)	Rule(A)	Rule(B)	Rule(C)
Average (10 ⁶ m ³)	Andong Dam	773.57	773.35	756.34	802.84	805.42	788.20
	Imha Dam	351.15	350.10	346.27	349.99	352.88	347.61
Variation	Andong Dam	118,160.50	118,288.27	126,811.23	126,131.81	124,524.66	135,291.22
	Imha Dam	27,444.07	27,240.06	28,368.38	28,262.75	26,891.03	28,687.67
Standard Deviation	Andong Dam	343.74	343.93	356.11	355.15	352.88	367.82
	Imha Dam	165.66	165.05	168.43	168.12	163.98	169.37
Max. (10 ⁶ m ³)	Andong Dam	1,224.02	1,224.02	1,224.02	1,224.02	1,224.02	1,224.02
	Imha Dam	548.19	548.19	548.19	548.19	548.19	548.19
Min. (10 ⁶ m ³)	Andong Dam	115.70	112.22	57.57	117.85	128.43	74.99
	Imha Dam	46.70	40.68	21.91	38.50	41.50	14.99

Table 4. Comparison of Water Supply Analysis

Classification		Constant Water Demand			Variation Water Demand		
		Rule(A)	Rule(B)	Rule(C)	Rule(A)	Rule(B)	Rule(C)
Water Supply Deficit Frequency	Andong Dam	7	7	6	5	5	6
	Imha Dam	12	10	12	11	10	11
	Control Point	15	14	14	14	13	14
Water Supply Deficit (10 ⁶ m ³)	Andong Dam	363.58	362.96	296.84	200.45	211.04	130.52
	Imha Dam	376.24	361.05	342.28	346.43	348.50	322.00
	Control Point	739.82	724.01	639.12	546.88	559.54	452.52
Average Storage (10 ⁶ m ³ /Months)	Andong Dam	773.57	773.35	756.34	803.21	805.79	788.20
	Imha Dam	351.15	350.10	346.27	350.28	353.17	347.61
Average Stage (EL. m)	Andong Dam	147.42	147.41	146.62	148.31	148.28	147.49
	Imha Dam	151.56	151.54	151.10	151.50	151.77	151.13

하류 Control Point에서는 15회 부족이 발생하였다. 부족량을 살펴보면 안동댐의 경우 363.58 10⁶m³이 부족하였으며, 임하댐의 경우 376.24 10⁶m³, 하류 Control Point에서는 739.82 10⁶m³의 부족량이 발생하였다.

Rule(B)에서 안동댐의 용수부족횟수는 7회로 나타났으며, 임하댐은 10회, 하류 Control Point에서는 14회 부족이 발생하였다. 부족량을 살펴보면 안동댐의 경우 362.96 10⁶m³이 부족하였으며, 임하댐의 경우 361.05 10⁶m³, 하류 Control Point에서는 724.01 10⁶m³의 부족량이 발생하였다.

Rule(C)에서 안동댐의 용수부족횟수는 6회로 나타났으며, 임하댐은 12회, 하류 Control Point에서는 14회 부족이 발생하였다. 부족량을 살펴보면 안동댐의 경우 296.84 10⁶m³이 부족하였으며, 임하댐의 경우 342.28 10⁶m³, 하류 Control Point에서는 639.12 10⁶m³의 부족량이 발생하였다.

NYC-Allocation Rule(A), (B), (C)에 따른 용수 공급 분석결과에서 용수부족량은 Rule(C)가 가장 적게 발생하는 것으로 분석되었다.

월별 용수공급량의 변화를 고려하여 NYC-Allocation Rule(A), (B), (C)에 따른 안동댐과 임하댐의 용수공급 분석결과를 살펴보면 Rule(A)에서 안동댐의 용수부족횟수는 5회로 나타났으며, 임하댐은 11회, 하류 Control Point에서는 14회 부족이 발생하였다. 부족량을 살펴보면 안동댐의 경우 200.45 10⁶m³이 부족하였으며, 임하댐의 경우 346.43 10⁶m³, 하류 Control Point에서는 546.88 10⁶m³의 부족량이 발생하였다.

Rule(B)에서 안동댐의 용수부족횟수는 5회로 나타났으며, 임하댐은 10회, 하류 Control Point에서는 13회 부족이 발생하였다. 부족량을 살펴보면 안동댐의 경우 211.04 10⁶m³이 부족하였으며, 임하댐의 경우 348.50 10⁶m³, 하류 Control Point에서는 559.54 10⁶m³의 부족량이 발생하였다. Rule(C)에서 안동댐의 용수부족횟수는 6회로 나타났으며, 임하댐은 11회, 하류 Control Point에서는 14회 부족이 발생하였다. 부족량을 살펴보면 안동댐의 경우 130.52 10⁶m³이 부족하였으며, 임하댐의 경우 322.00 10⁶m³, 하류 Control Point에서는 452.52 10⁶m³의 부족량이 발생

하였다. NYC-Allocation Rule(A), (B), (C)에 따른 용수공급 분석결과에서 용수부족량은 Rule(C)가 가장 적게 발생하는 것으로 분석되었다.

4. 결 론

본 연구에서 병렬구성으로 구성된 안동댐과 임하댐의 저수지 연계운영에 있어서 NYC-Space Allocation Rule을 용수요구량이 매월 일정할 경우와 월별용수요구량이 변화를 고려할 경우 1992~2003년까지 적용하여 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

먼저 안동댐과 임하댐의 평균 Allocation 계수를 비교하여 보면 공급량이 일정할 경우와 공급량의 변화를 고려할 경우 Rule(A), Rule(B)에서는 안동댐의 기여도가 높은 것으로 나타났으며, Rule(C)에서 안동댐과 임하댐의 기여도가 비슷한 것으로 분석되었다. Refill Season의 경우에는 안동댐의 기여도가 증가되는 것으로 나타났다.

저류량 분석결과에서 평균저류량을 살펴보면 안동댐의 경우 공급량이 일정할 경우 Rule(A), Rule(B), Rule(C)에서 Rule(C)의 경우가 저류량의 변화는 크게 줄어들지 않으나 용수부족량의 경우 감소하는 것으로 나타났다.

공급량의 변화를 고려한 경우에서도 Rule(C)의 경우가 공급량의 부족이 가장 작게 나타났다. 공급량이 일정한 경우와 월별공급량의 변화를 고려한 경우에는 월별 변화량을 고려한 경우가 부족이 적게 발생되어 용수공급해석에 있어서 일정량 방식의 해석보다는 월별공급량의 변화를 고려하여 분석하는 것이 더욱 효과적인 것으로 판단되었다.

향후 연구에서 저수지의 용수공급의 의사결정에 있어 신뢰도 지표를 선정하여 분석함으로써 용수공급방안의 결정에 있어서 신뢰도 지표를 추가하여 제시함으로써 보다 나은 방안의 결정에 도움이 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) Edward, J. C., 1950, New York control curves, J. Am. Water Works Assoc, 42(9), 823-857.
- 2) Sand, G. M., 1984, An analytical investigation of water supply reservoir in parallel, Ph. D. thesis, Cornell Univ., Ithaca, N. Y.
- 3) Johnson, S. A. and K. Staschus, 1991, Heuristic Operating Policies for Reservoir System Simulation, W.R.R., 27(5), 673-685.
- 4) Lund, J. R. and J. Guzman, 1999, Derived Operating Rules for Reservoirs in Series or in Parallel, Journal of Water Resources Planning and Management, 125(3), 143-153.
- 5) 박기범, 이순탁, 2004, 가뭄기간의 저수지 운영 방안에 관한 연구, 한국환경과학회지, 13(12), 1041-1048.
- 6) Mingyen, Tu., 2002, Optimal of Reservoir Operation and Rule Curves by Mixed-Integer Programming., Ph. D. thesis California Univ. Los Angels, 2-25.
- 7) 수자원 관리종합 정보시스템, <http://wamis.or.kr/>
- 8) Revelle, C., 1999, Optimizing Reservoir Resources Including A New Model for Reservoir Reliability., John Willy & Sons Inc., 22-44
- 9) Hashimoto, T., J. R. Stedinger and D. P. Loucks, 1982, Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria For Water Resources System Performance Evaluation, W.R.R., 18(1), 14-20.
- 10) Stedinger, J. R., 1984, The performance of LDR models for preliminary design and reservoir operation, W.R.R., 20(2), 215-224.
- 11) 건설교통부, 1998, 한국수자원공사 기존댐 용수 공급능력평가 보고서(낙동강수계), 1998. 12.