

공급량 배분기법을 이용한 갈수기 병렬저수지 해석

박 기 범 · 이 순 탁*

안동과학대학 건설정보과, '영남대학교 토목도시환경공학부
(2005년 11월 28일 접수; 2006년 1월 3일 채택)

Parallel Reservoir Analysis of Drought Period by Water Supply Allocation Method

Ki-Bum Park and Soon-Tak Lee*

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

*School of Civil, Urban & Environment Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Korea

(Manuscript received 28 November, 2005; accepted 3 January, 2006)

In this study, an optimization technique was developed from the application of allocation rule. The results obtained from the water supply analysis and reliability indices analysis of Andong dam and Imha dam which are consist of parallel reservoir system are summarized as the followings;

Allocation rule(C) is effective technique at the parallel reservoir system because results of the water supply analysis, storage analysis and reliability indices analysis is calculated reasonable results. Also, reliability indices analysis results are not sufficient occurrence based reliability or quantity based reliability. Thus reliability indices analysis are need as occurrence based reliability, quantity based reliability vulnerability, resilience, average water supply deficits and average storage. And water supply condition is better varying water supply condition than constant water supply condition.

Key Words : Parallel reservoir, Drought, Water supply, Allocation rule

1. 서 론

일반적으로 저수지의 용수공급문제를 해석하는데 있어서 갈수기를 포함한 저수지운영에 있어서는 아직까지 특별한 기준이 없으며, 기본계획 방류량등 상시보장량을 설정하여 공급하는 일종의 일정량공급(firm supply)방식과 농업용수의 월별 변화량을 고려하여 연간 총공급량을 기준으로 해석하고 있다. 그러나 현재 댐운영 방안에서는 하류의 유황조건이 극심한 가뭄상황에서도 상시보장량의 공급이 되지 않는 경우가 발생하고 있는 실정이다. 갈수기에 댐운영에서는 저류의 관점에서 용수공급을 최대화 혹은 용수부족발생량의 최소화를 위하여 의사결정을 해야 하며, 갈수기의 용수공급해석은 특히 중요성이 증가되며 물부족의 최소화가 어떤 방식으로 이루어

져야 할 것인지에 대한 판단을 하기가 쉬운 것은 아니다. 용수부족발생의 개념은 횟수와 양적인 면을 고려하게 되며 공급의 방식에서도 일정양에 대한 공급방식과 월별 변화율을 고려할 것인가에 대한 선택이 분석단계에서 발생하게 된다.

병렬저수지의 연계운영에 관한 연구로서 Clark (1950)¹⁾이 New York시의 용수공급문제를 해결하기 위해 NYC(New York City) rule을 적용하여 New York 시의 용수공급 시스템에서 각 유역의 저류량을 모든기간에 대해 동일한 실패률을 가지도록 시스템을 운영하였다. Johnson(1991)²⁾등은 저수지 시스템의 운영에 있어 heuristic operating policies를 적용하여 저수지 제약조건과 보충기간(refill season)의 저수량 목적에 적용하여 발전함수를 최적화 하였으며, Lund(1999)³⁾등은 직렬저수지와 병렬저수지의 운영방안 도출에 관한 연구로서 hedging rule과 space rule을 적용하여 분석하였다. 박기범(2004)⁴⁾ 등은 가뭄기간의 저수지 최적운영에서 제약조건의

Corresponding Author : Ki-Bum Park, Department of Construction Information Andong Science College, Andong 760-820, Korea
Phone: +82-54-851-3604
E-mail: pkb5032@naver.com

변화에 따라 용수공급의 능력을 해석하고 신뢰도 평가를 실시하였으며, Ming-Yen Tu(2002)⁵⁾는 가뭄 기간에 대하여 hedging rule을 이용한 저수지 용수 배분 문제를 최적화 하였다.

저수지 용수공급 신뢰도에 관한 연구는 현재 국내외적으로 다양하게 진행되어오고 있으며 특히 물 부족 현상이 자주 발생함에 따라 저수지의 용수공급 능력 평가에 관한 연구도 상당히 이루어져 왔으며, 주요 연구사례들을 살펴보면 다음과 같다. 국외의 경우에 있어서 최초의 신뢰도에 대한 개념 도입은 Revelle 등(1969)⁶⁾의 선형 결정률에 의한 기회제약기법 적용으로 시작되었다. Hashimoto 등(1982)⁷⁾은 용수공급 저수지의 운영을 위한 연구에서 신뢰도, 복원도, 부족심도의 3가지 기준을 통해 제시된 바 있다. 특히, Moy 등(1986)⁸⁾의 논문은 혼합정수계획기법을 적용하여 평가기준을 명확하게 최적화 모형 내에 포함시켰지만 저수지의 복원도 부분은 연속 물부족 발생의 최대치로서 부분적으로만 고려하였다. Vortruba와 Broza(1989)⁹⁾는 신뢰도 기준을 빈도 (occurrence-based), 시간(time-based), 양적기준 (quantity-based)신뢰도 세가지 관점을 기준으로 용수공급의 복원도에 관한 연구를 수행하였으며, Srinivasan 등(1999)¹⁰⁾은 Moy 등(1986)의 논문의 결점을 보완하기 위하여 용수불만족 상황으로부터 정상으로 회복되어 가는 과정을 추적하는 2개의 정수형 변수를 추가함으로써 복원도에 대한 정량화를 개선하였다.

한편 국내의 경우는 정상만 등(1994)¹¹⁾은 댐의 용수공급 능력을 평가하기 위한 지표로서 신뢰도, 복원도, 취약도 등을 사용한 바 있다. 심명필 등(1997)¹²⁾은 저수지의 물공급을 위한 신뢰도 분석에 대한 연구에서 시간, 빈도, 양적기준 신뢰도와 복원도, 취약도 등을 유입량 자료의 추계학적으로 모의 발생한 후 신뢰도를 평가한 바 있다. 그러나 많은 연구가 선행되었음에도 불구하고 용수공급의 해석방법에 있어 공급량 기준에 있어 월별 일정량 방식과 월별 변화량을 고려한 경우에 대한 비교가 이루어지지 않았으며, 갈수시 제약조건들이 평상시의 운영기준과 갈수시 저류상황을 고려한 경우에 대한 비교 등에 대한 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 별령저수지의 용수공급문제를 해석하는데 있어 공급량을 일정량 공급방식과 월별 변화율을 고려했을 경우의 방법을 비교·연구 토록 하였다. 그리고 분석의 제약조건이 갈수기에 대하여 상시만수량을 제약조건으로 하는 경우와 저수지의 평균저수량으로 제약조건으로 할 경우에 대하여 각각의 용수공급능력을 분석하고 이에 대한

신뢰도 분석을 실시하여 제시함으로써 갈수기 용수공급방안을 결정하는 데 있어 선택에 대한 필요한 지표들을 제시하고자 한다.

2. 공급량 배분기법의 기본이론

Revelle(1999)¹³⁾는 하천유역에 별령구조를 가진 서로 독립적인 저수지들이 저류상태와 유입량 상태에 따라 하류지역의 용수공급에 있어서 별령저수지의 용수공급 배분 방안을 제시하였다. 저수지 시스템의 용수부족량을 최소화하는 방법에는 두 가지 다른 개념과 접근방법으로 분류할 수 있다.

먼저, 동일 기간의 조절점에서의 각 저수지에서 공급한 양의 비율에 따라 할당할 수 있으며, 각월의 공급량의 비율에 따라 각월에 대해 할당비율을 계산할 수 있다.

다음으로, 저수지시스템의 상태에 영향을 주는 변수들, 즉 예상되는 유입량과 저수량 상태와 다른 저수지의 예상되는 유입량과 저수량 상태의 비율에 따라 공급량 할당비율을 결정할 수 있다.

공급량 할당비율의 산정에 있어 저수지의 요구되는 방류량의 할당을 저수지 공간의 비율에 따라 계획유입량의 비율을 고려하여 비홍수기의 순환에 따라 모든 저수지의 방류량을 결정하는 것으로 본 연구에서는 유입량을 과거 유입량 자료를 이용하였으며, t 기간 말기에 대한 저수지 i 의 공급가능용량 (Free Volume)은 다음과 같이 산정할 수 있다.

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

여기서, ip_{it} : t 월의 저수지 i 의 유입량, v_{it} : 저수지 i 의 t 기간 말의 공급가능량, c_i : 저수지 i 의 총저류용량, x_{it} : t 월의 저수지 i 의 계산된 공급량(기여량), s_{it} : t 기간 말의 저수지 i 의 저류량이다. 전체저수지 시스템의 용량에 대한 저수지 i 에 대한 공급가능량의 비는 다음 식(2)와 같다,

$$\frac{[c_i - (s_{it-1} + ip_{it} - x_{it})]}{\sum_{i=1}^2 [c_i - (s_{it-1} + ip_{it} - x_{it})]} \quad (2)$$

식(2)는 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_{it} = \frac{ir_{it}}{\sum_{i=1}^2 ir_k} \quad (3)$$

여기서, ir_t : 저수지 i 의 유입량, α_{it} : 저수지 i

공급량 배분기법을 이용한 갈수기 병렬저수지 해석

에 대한 t 월의 용수요구량에 대한 할당계수이다. 따라서 공급량에 대한 공급가능량의 비율은 다음 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=1}^2 x_{it} = T_t \quad (4)$$

여기서, T_t : 병렬저수지 시스템의 용수공급량이다. 공급량의 비율은 다음 식(5)와 같이 된다.

$$\alpha_{it} = \frac{c_i - (s_{it-1} + ip_{it} - x_{it})}{\sum_{i=1}^2 [c_i - (s_{it-1} + ip_{it})] + T_t} \quad (5)$$

분모의 항은 총저류용량(c_i)과 저류량(s_{it}) 그리고 유입량(ip_{it})에 관한 변수들은 모두 기지의 값들이므로 다음 식(6)과 같이 상수(N_t)로 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=1}^2 (c_i - s_{it-1} - ip_{it}) = N_t \quad (6)$$

병렬저수지의 용수공급량(x_{it})은 다음과 같이 풀이할 수 있다

$$c_i - (s_{it-1} + ip_{it} - x_{it}) = \alpha_{it} (N_t + T_t) \quad (7)$$

여기서 ($N_t + T_t$)는 방류량과 손실량 그리고 초과방류량의 합계이다.

t 월에 대한 저수지 i 의 하류 용수공급량은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$x_{it} = \alpha_{it} (N_t + T_t) - c_i + s_{it-1} + ip_{it} \quad i = 1, 2 \quad (8)$$

식(8)과 같은 경우는 시스템의 운영기간동안 저류량을 최대로 하기위한 무효방류량을 최소로 하기위하여 하류에 필요한 만큼만 방류를 하고 홍수시 상시만수위 이하에서는 용수공급량 이외에는 방류가 되지 않도록 하였다. 하류지점에 대한 용수공급량(T_t)은 병렬저수지 시스템의 조절점에서의 식(9)~식(11)과 같은 할당식을 적용하여 추정할 수 있다. 각각의 저수지의 월별 용수공급기여도를 산정하는 방법으로는 저수지 i 로부터의 공급량할당이 저수지 i 의 저류량의 비율로 나타낼 수 있다. Rule(A)의 경우는 병렬저수지 t 기간에 i 저수지의 저류량과 병렬 저수지의 전체 저류량과의 비에 따른 배분율이다. 병렬저수지의 하류지점의 용수공급량을 결정하기 위하여 다음 식(9)~식(11)과 같은 배분규칙에 따

라 각각의 저수지에 공급배분율을 결정할 수 있다.

Rule (A)

$$x_{it} = \left[\frac{s_{it-1}}{\sum_{i=1}^2 s_{it-1}} \right] \times T_t \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

식(9)과 같은 Allocation Rule의 경우는 저수지의 현재의 유입량을 고려하지 않아 사용가능한 전체용량이 고려되지 않았으며 식(10)과 같이 유입량의 용량을 저수용량에 더하여 공급가능량으로 하여 공급비율을 결정할 경우는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

Rule (B)

$$x_{it} = \left[\frac{s_{it-1} + ip_{it}}{\sum_{i=1}^2 s_{it-1} + ip_{it}} \right] \times T_t \quad i = 1, 2 \quad (10)$$

마지막으로 저수량을 이용하여 월별 용수공급기여도의 산정에서 현재의 총 공급가능량을 저수지의 총저류량으로 나눈 비와 i 저수지의 현재의 총공급가능량을 총저류량으로 나눈 비에 따라 배분하는 것이 식(11)과 같은 배분방법이다.

Rule (C)

$$x_{it} = \left[\frac{(s_{it-1} + ip_{it})/c_i}{\sum_{i=1}^2 (s_{it-1} + ip_{it})/c_i} \right] \times T_t \quad i = 1, 2 \quad (11)$$

식(11)에 의한 공급량 비율은 t 월에 대한 저수지 i 로부터 저수지의 총용량과 유입량을 포함한 저수지 저류상태의 비율에 의해 산정될 수 있다.

식(9)~(11)의 Allocation Rule(A),(B),(C)는 저수지 시스템의 T_t 는 저수지 시스템의 운영과정에서 초기에 계획용수공급량으로 설정하여 여기에 할당계수를 곱하여 구해질 수 있다. 여기에 Allocation Rule(A)는 다음과 같은 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} s_{it} &= s_{it-1} + ip_{it} - x_{it} \\ 0 &\leq s_{it-1} + ip_{it} - x_{it} \leq c_i \end{aligned} \quad (12)$$

$$s_{it} = c_i \quad c_i < s_{it-1} + ip_{it} - x_{it} \quad (13)$$

$$s_{it} = [inadmissible/stop]$$

$$s_{it-1} + ip_{it} - x_{it} < 0 \quad (14)$$

시스템의 최대공급량을 결정하는 데 있어서 먼저 T_t 의 값을 결정하여 한다. T_t 는 각각의 저수지의 분리된 공급량 보다는 크거나 같아야 한다. T_t 의 값을 가정하면 T_t 는 식(12)과 식(14)에 따라서 점차 증가하여 저수지의 저류량이 (-)가 될 경우에 다른 저수지에서 보다 많은 방류를 하도록 유도할 것이다.

3. 병렬저수지 시스템에 대한 공급량 배분기법의 적용 및 신뢰도 분석

3.1. 유입량 자료의 특성 및 배분기법과 신뢰도 분석

먼저 안동댐과 임하댐의 건설이후의 유입량자료를 수집하였으며, 다음으로 각 월에 대한 유입량의 통계적인 특성을 분석하여 Fig. 1~Fig. 2에 나타내었다. 유량의 합계와 평균, 분산은 단위가(MCM : $10^6 m^3$)이며, 표준편차와 월별 유입량의 최대, 최소는 단위가 (CMS : m^3/s)이다. 안동댐과 임하댐의 1992

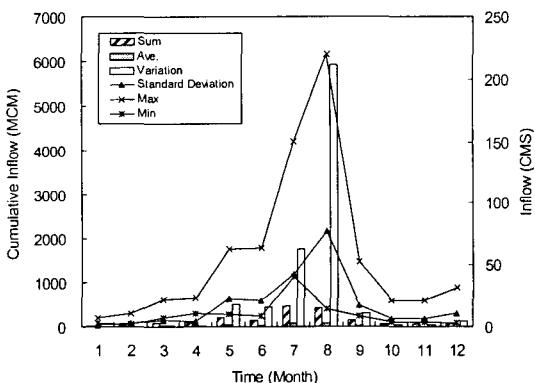


Fig. 1. Statistic characteristics of the Andong dam inflow (1992~1997).

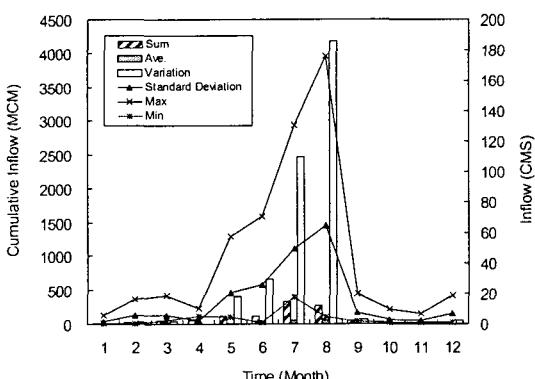


Fig. 2. Statistic characteristics of the Imha dam inflow (1992~1997).

~1997년까지의 유입량자료를 분석한 결과 안동댐의 월평균유입량은 $25.41 m^3/s$ 이었으며, 임하댐의 경우는 $17.09 m^3/s$ 이었다. 그리고 10월부터 6월까지의 보충기간 유입량의 평균이 안동댐의 경우 $14.48 m^3/s$ 이었으며, 임하댐의 경우 $8.41 m^3/s$ 이었다. 안동댐의 유입량에 대한 통계분석 결과를 살펴보면 8월에 가장 많은 유입량이 유입되는 것으로 분석되었다. 풍수기인 7, 8, 9월에 총유입량의 81% 정도가 유입되는 것으로 분석되었다. 그러나 분산이 8월이 가장 크게 나타나 월 유입량의 변동폭이 큰 것으로 분석되었다. 임하댐의 유입량에 대한 통계분석결과에서는 안동댐과 같이 7월에 가장 많은 유입량이 유입되는 것으로 분석되었으며, 풍수기인 7, 8, 9월에 총유입량의 66% 정도가 유입되는 것으로 안동댐보다 임하댐이 풍수기에 유입되는 비중이 큰 것으로 분석되었다. 그러나 분산이 8월이 가장 크게 나타나 월별 유입량의 변동폭이 큰 것으로 분석되었다. 안동댐과 임하댐의 경우 보충기간 유입량이 평균유입량의 각각 56.9%, 49.2% 정도로 나타났다.

본 연구에서는 낙동강 수계에 병렬저수지 시스템으로 구성된 안동댐과 임하댐에 대하여 allocation rule을 이용한 시스템을 구성하여 7, 8, 9월의 풍수기와 보충기간의 저수지의 용수공급량의 부족분을 최소화하고, 저류량을 최대화할 수 있는 방안으로 공급량을 할당하여 하류에 용수공급을 충족시키는 방안에 대하여 분석하였다. 또한 용수공급해석에 있어 분석기준의 설정으로 일정량 공급방식과 월별 변화량을 고려하였다. 그리고 저수지 운영방안의 의사결정에 지표가 될 수 있는 신뢰도 평가지표들인 빈도기준 신뢰도, 양적기준 신뢰도, 복원도, 취약도, 평균부족량을 산정하여 병렬저수지 운영에서 효율적인 방안을 제시하였다.

3.2. 공급량 배분계수의 산정

가뭄기간에 대한 안동댐과 임하댐의 병렬저수지 시스템을 초기조건을 상시만수위 조건과 평균저수위 조건 그리고 용수공급량이 일정한 경우와 월별 용수공급량이 변하는 경우에 대하여 분석을 실시하였다. 초기조건을 상시만수위로 설정하고 월별 용수공급량이 일정한 경우를 DC(Drought Condition)1 조건이라 하며, 초기조건이 상시만수위이고 월별용수공급량의 변화를 고려한 경우는 DC2이다. 초기조건을 평균저수위로 하고 월별 용수공급량이 일정한 경우 DC3이고 초기조건이 평균저수위이며, 월별 용수공급량의 변화를 고려한 경우는 DC4라 하였다. 각 분석방법에 대한 구분을 다시 정리하면 다음 Table 1과 같다.

병렬구성으로 구성된 안동댐과 임하댐의 저수지 연

공급량 배분기법을 이용한 갈수기 병렬저수지 해석

Table 1. Classification of reservoir analysis conditions

Classifications	Initial condition	Water supply condition
DC1	Normal pool storage	Constant
DC2		Variation
DC3	Average storage	Constant
DC4		Variation

계운영에 있어서 allocation rule을 용수요구량이 매월 일정할 경우와 월별 용수요구량이 변화를 고려할 경우 적용한 가뭄기간에 적용하여 분석한 결과

를 요약하면 다음 Table 2~Table 3과 같다.

먼저, 배분계수를 산정한 결과에서 Table 2~Table 3에 나타난 바와 같이 rule(C)일 경우 안동댐과 임하댐의 하류의 용수공급 기여도가 안동댐이 약 53%, 임하댐이 약 47% 정도로 대등하게 나타났으나, rule(A), rule(B)의 경우에는 안동댐의 의존도가 65%~70% 정도로 높은 것으로 분석되었다. 보충기간의 경우에 rule(A)의 경우에는 평균보다 안동댐의 의존도가 조금 낮아지는 반면에 rule(B), rule(C)의 경우에는 더욱 안동댐에 대한 의존도가 높아지는 것으로 분석되었다.

Table 2. Comparison of the Andong dam allocation coefficients

Months	Normal pool storage condition						Average storage condition					
	DC1			DC2			DC3			DC4		
	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	0.595	0.775	0.578	0.602	0.739	0.578	0.595	0.772	0.563	0.602	0.734	0.563
2	0.596	0.769	0.572	0.603	0.733	0.572	0.596	0.759	0.548	0.603	0.722	0.548
3	0.595	0.752	0.552	0.601	0.716	0.552	0.595	0.742	0.528	0.601	0.705	0.528
4	0.596	0.781	0.590	0.607	0.750	0.590	0.598	0.778	0.572	0.607	0.747	0.572
5	0.599	0.766	0.631	0.608	0.780	0.631	0.600	0.752	0.614	0.608	0.766	0.614
6	0.593	0.691	0.600	0.602	0.755	0.600	0.591	0.673	0.581	0.602	0.739	0.581
7	0.693	0.625	0.491	0.695	0.675	0.491	0.698	0.611	0.478	0.695	0.661	0.478
8	0.688	0.580	0.484	0.682	0.668	0.484	0.684	0.555	0.460	0.682	0.645	0.460
9	0.696	0.632	0.482	0.684	0.664	0.482	0.696	0.610	0.461	0.684	0.643	0.461
10	0.700	0.691	0.474	0.689	0.653	0.474	0.702	0.686	0.468	0.689	0.647	0.468
11	0.708	0.728	0.505	0.697	0.679	0.505	0.711	0.724	0.500	0.697	0.675	0.500
12	0.706	0.749	0.524	0.704	0.697	0.524	0.710	0.746	0.521	0.704	0.693	0.521
average	0.647	0.712	0.540	0.648	0.709	0.540	0.648	0.701	0.525	0.648	0.698	0.525
Refill season ave.	0.632	0.745	0.558	0.635	0.723	0.558	0.633	0.737	0.544	0.635	0.714	0.544

Table 3. Comparison of the Imha dam allocation coefficients

Months	Normal pool storage condition						Average storage condition					
	DC1			DC2			DC3			DC4		
	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	0.238	0.213	0.422	0.231	0.261	0.422	0.238	0.218	0.437	0.231	0.266	0.437
2	0.237	0.218	0.428	0.231	0.267	0.428	0.238	0.228	0.452	0.231	0.278	0.452
3	0.238	0.231	0.448	0.232	0.284	0.448	0.238	0.241	0.472	0.232	0.295	0.472
4	0.237	0.208	0.410	0.226	0.250	0.410	0.236	0.211	0.428	0.226	0.253	0.428
5	0.234	0.228	0.369	0.225	0.220	0.369	0.233	0.243	0.386	0.225	0.234	0.386
6	0.241	0.305	0.400	0.231	0.245	0.400	0.242	0.322	0.419	0.231	0.261	0.419
7	0.307	0.375	0.509	0.305	0.325	0.509	0.302	0.389	0.522	0.305	0.339	0.522
8	0.312	0.420	0.516	0.318	0.332	0.516	0.316	0.445	0.540	0.318	0.355	0.540
9	0.304	0.368	0.518	0.316	0.336	0.518	0.304	0.390	0.539	0.316	0.357	0.539
10	0.300	0.309	0.526	0.311	0.347	0.526	0.298	0.314	0.532	0.311	0.353	0.532
11	0.292	0.272	0.495	0.303	0.321	0.495	0.289	0.276	0.500	0.303	0.325	0.500
12	0.294	0.251	0.476	0.296	0.303	0.476	0.290	0.254	0.479	0.296	0.307	0.479
average	0.270	0.283	0.460	0.269	0.291	0.460	0.269	0.294	0.475	0.269	0.302	0.475
Refill season ave.	0.257	0.248	0.442	0.254	0.277	0.442	0.256	0.256	0.456	0.254	0.280	0.456

Fig. 3과 Fig. 4는 분석기간 동안의 안동댐과 임하댐에 대하여 공급량이 매월 일정할 때 배분계수와 월별 공급량의 변화를 고려하였을 경우의 각 rule에 대한 배분계수를 산정한 결과이다. Fig. 3의 안동댐의 rule에 대한 분석기준별 배분계수 산정결과에서 제약조건이 평균저류량이고 용수공급량의 월별 변화를 고려한 경우 가장 낮게 나타났다. Fig. 4에서 임하댐의 경우 높게 나타나 가뭄기간과 같이 병렬저수지에서 하류에 용수공급이 어느 한쪽에 과다한 부담을 주지 않고 저류상태에 따른 균형적인 공급을 이루면서 안정적인 저류상태를 유지한다고 할 수 있다.

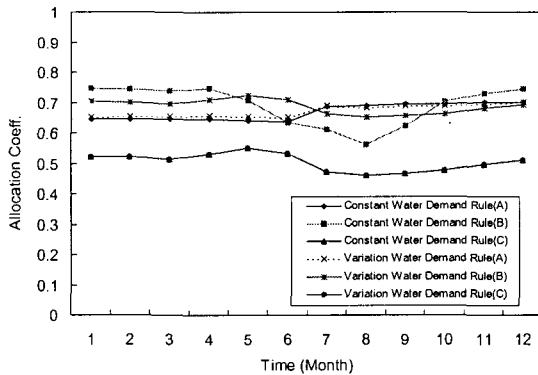


Fig. 3. Comparison of the Andong dam allocation coefficients.

3.3. 공급량 배분계수를 이용한 저수지 분석결과 용수공급분석 결과에서는 Table 4와 같이 대체로 rule(A), rule(B), rule(C)의 순서로 하류 조절점(control point)에서 부족횟수가 줄어드는 경향을 나타내는 것으로 분석되었다. 부족량의 발생에도 rule(C)의 경우가 부족량이 가장 낮은 것으로 분석되었다. 반면에 평균저류량은 rule(C)가 가장 낮았다. 이는 allocation rule의 적용에 의하여 임하댐의 부족분을 보안하고 무효방류량을 최소화하고 용수부족량의 최소화와 저류량의 효율적인 이용에 따라 낮아진 것으로 판단된다. Fig. 5~Fig. 6에 나타난 바와 같이 DC1(rule(A))에서 DC4(rule(C))로 갈수록 용수

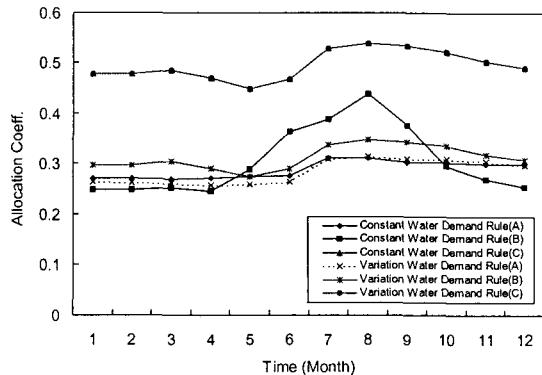


Fig. 4. Comparison of the Imha dam allocation coefficients.

Table 4. Comparison of Water supply analysis

Conditions		Normal pool storage condition						Average storage condition					
		DC1			DC2			DC3			DC4		
Classifications		rule(A)	rule(B)	rule(C)	rule(A)	rule(B)	rule(C)	rule(A)	rule(B)	rule(C)	rule(A)	rule(B)	rule(C)
Water supply deficit frequency	Andong dam	7	7	6	5	5	6	7	7	6	6	6	7
	Imha dam	12	10	12	11	10	11	12	11	13	11	11	12
	control point	15	14	14	14	13	14	15	13	15	15	14	15
Water supply deficit ($10^6 m^3$)	Andong dam	363.58	362.96	296.84	200.45	211.04	130.52	363.58	359.36	296.84	262.16	272.62	203.12
	Ihma dam	376.24	361.05	342.28	346.43	348.50	322.00	376.24	377.67	303.19	346.43	360.62	335.88
	control point	739.82	724.01	639.12	546.88	559.54	452.52	739.82	737.03	600.03	608.59	633.25	539.01
Average storage ($10^6 m^3/Mon$)	Andong dam	643.30	643.06	628.50	680.47	682.49	671.24	634.30	536.98	524.60	525.78	526.60	518.57
	Ihma dam	270.70	270.35	264.64	267.41	273.16	264.81	270.70	221.10	208.27	216.48	222.67	215.88
Average stage (EL. m)	Andong dam	142.67	142.65	141.67	143.70	143.83	143.07	142.67	140.16	139.35	139.82	139.85	139.35
	Ihma dam	145.38	145.44	144.65	144.87	145.73	144.57	145.38	143.13	141.44	142.48	143.34	142.51

공급량 배분기법을 이용한 갈수기 병렬저수지 해석

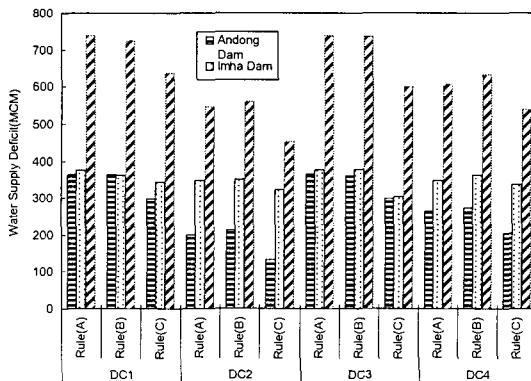


Fig. 5. Comparison of water supply deficit.

부족량이 적어지면서 안동댐의 저류량은 뚜렷하게 감소하는 경향을 보이나 임하댐은 저류량의 변화가 크게 나타나지 않았다. 공급량 배분규칙에 의하여 안동댐과 임하댐의 상호보완적인 연계운영에 의하여 공급량을 적절히 할당하여 상대적으로 용수공급 가능량을 많이 보유하고 있는 안동댐의 용수공급이 많이 이루어진 것으로 판단된다. 분석기준에서는 가

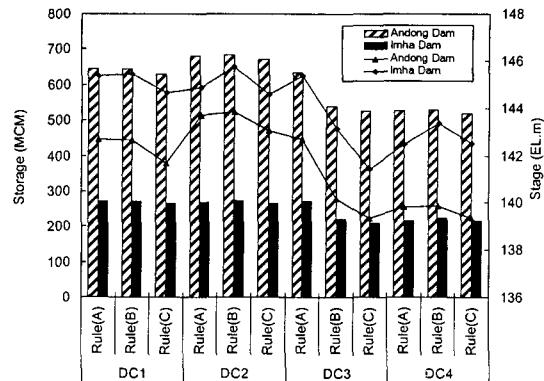


Fig. 6. Comparison of average storage and stage.

물기간에 실질적으로 상시만수량을 기준으로 분석하는 데에는 용수공급해석의 과대 평가가 이루어질 수가 있다. 평균저수량을 제약조건으로 하였을 경우에 보다 실질적인 해석이 이루어 진다고 할 수 있으며, 용수공급측면과 평균저류량에서도 양호한 결과를 보여주고 있다.

신뢰도 분석결과에서는 Table 5에서와 같이 빈도

Table 5. Comparison of reliability analysis

Classifications		Conditions		Normal pool storage condition				Average storage condition			
				DC1		DC2		DC3		DC4	
		rule(A)	rule(B)	rule(C)	rule(A)	rule(B)	rule(C)	rule(A)	rule(B)	rule(C)	rule(A)
Occurrence based frequency reliability (%)	Andong dam	89	89	91	92	92	91	89	89	91	91
	Imha dam	82	85	82	83	85	83	82	83	80	83
	control point	77	79	79	79	80	79	77	80	77	79
Quantity based frequency reliability (%)	Andong dam	93	93	94	96	96	97	93	93	94	95
	Imha dam	86	87	87	87	87	88	86	86	89	87
	control point	91	91	92	93	93	94	91	91	92	92
Resiliency	Andong dam	0.43	0.43	0.17	0.20	0.20	0.33	0.43	0.43	0.17	0.33
	Imha dam	0.25	0.40	0.25	0.36	0.40	0.36	0.25	0.36	0.23	0.36
	control point	0.20	0.29	0.21	0.29	0.31	0.29	0.20	0.38	0.27	0.27
Average water supply deficit ($10^6 m^3$)	Andong dam	16.82	16.51	37.53	31.19	25.90	23.72	16.82	15.72	37.53	18.23
	Imha dam	19.67	6.27	25.33	12.01	6.76	15.07	19.67	9.30	28.44	12.01
	control point	63.96	59.51	72.52	56.39	58.23	60.18	63.96	55.43	68.65	57.57
Vulnerability	Andong dam	1.78	1.75	3.41	2.36	1.96	2.16	1.78	1.67	3.41	1.66
	Imha dam	3.58	0.95	4.61	2.00	1.02	2.51	3.58	1.55	5.60	2.00
	control point	14.54	12.62	15.38	11.96	11.47	12.77	14.54	10.92	15.60	13.09

기준 신뢰도 분석에서는 rule(B)가 대체로 높은 신뢰도를 보여주고 있으며, 안동댐과 임하댐의 신뢰도보다 control point에서의 신뢰도가 낮게 분석되었다.

그러나 양적기준신뢰도의 경우에는 DC2의 rule(C)에서 가장 높은 신뢰도를 나타내고 있으며 안동댐과 임하댐의 신뢰도 값 사이에 하류 control point의 신뢰도를 나타내고 있는 것으로 나타났다. 여기서 빙도기준 신뢰도와 양적기준 신뢰도의 차이를 살펴보면, 빙도기준 신뢰도의 경우 안동댐과 임하댐의 신뢰도보다 하류가 적은 신뢰도를 나타내지만 양적기준 신뢰도의 경우에는 부족량을 기준으로 신뢰도를 산정하기 때문에 용수공급이 상호보완적으로 이루어질 경우 안동댐과 임하댐신뢰도 사이의 신뢰도를 나타내고 있다. Table 4에서 용수부족량은 rule(C)의 경우가 가장 작게 나타났으나 평균 용수부족량이 크게 나타난 경우는 용수부족량을 부족횟수로 나누어 산정한 것으로 rule(C)의 경우 신뢰도 분석에서 나타난 바와 같이 부족횟수가 가장 작게 나타나 높은 신뢰도를 보여주기 때문에 크게 나타난 것이다.

복원도의 경우는 rule(C)가 대체로 0.5 이하의 값 을 보여주고 있어 분석단위가 월단위로 분석하였으므로 정상상태로의 복원하는 기간이 한달 이내로 정상상태로 되돌아오는 것을 알 수가 있다. 취약도의 분석결과에서는 용수부족량이 대체로 비슷하게 나타났으나 부족횟수의 차이에 의해 rule(B)의 경우가 가장 양호한 결과를 보여주고 있으나 rule(C)의 경우에 다소 크게 나타 다른 방법에 비해 부족횟수는 적게 발생하나 용수부족이 발생할 경우 용수부족량이 다소 크게 나타나는 것으로 판단된다.

4. 분석결과의 고찰

낙동강 유역의 병렬저수지 시스템인 안동댐과 임하댐의 갈수기에 대하여 allocation rule을 이용한 용수공급 분석을 한 결과 안동댐과 임하댐의 공급량 배분(allocation) 계수를 산정한 결과에서 rule(C) 일 경우 안동댐과 임하댐의 하류의 용수공급 기여도가 안동댐이 약 53%, 임하댐이 약 47% 정도로 대등하게 나타났으나, rule(A), rule(B)의 경우에는 안동댐의 의존도가 65%~70% 정도로 높은 것으로 분석되었다.

저류량 분석결과에서는 전체적으로 DC1(rule(A))에서 DC4(rule(C))로 갈수록 용수부족량이 적어지면서 안동댐의 저류량은 뚜렷하게 감소하는 경향을 보이나 임하댐은 저류량의 변화가 크게 나타나지 않았다. allocation rule에 의하여 안동댐과 임하댐의 상호보완적인 연계운영에 의하여 공급량을 적절히

할당하여 상대적으로 용수공급 가능량을 많이 보유하고 있는 안동댐의 용수공급이 많이 이루어진 것으로 판단된다.

용수공급 분석결과에서는 대체로 rule(A), rule(B), rule(C)의 순서로 하류 control point에서 부족횟수가 줄어드는 경향을 나타내는 것으로 분석되었다. 부족량의 발생에도 rule(C)의 경우가 부족량이 가장 낮은 것으로 분석되었으며, 반면에 평균저류량은 rule(C)가 가장 낮게 분석되었다. 이는 allocation rule의 적용에 rule(C)가 저류량과 유입량의 합을 댐의 평균저류량으로 나눈 비에 의해 공급량이 할당되어 안동댐과 임하댐의 각각의 저류상태와 공급능력 상태에 따라 공급량이 할당되어 가장 양호한 결과를 보여주고 있다.

실제 가뭄기간에 저수지 운영방안에서는 저수지의 상태가 가장 유사한 DC(4)조건의 allocation rule(C)가 빙도신뢰도의 결과에서는 rule(B)의 경우보다 떨어지지만 양적기준 신뢰도에서는 오히려 증가된 신뢰도를 나타내고 있다. 또한, 복원도의 경우에서도 우수한 결과를 나타내나 취약도의 경우에는 상대적으로 부족의 심도가 큰 것으로 나타났다.

5. 결 론

낙동강 유역의 병렬저수지 시스템인 안동댐과 임하댐의 갈수기에 대하여 allocation rule을 이용한 용수공급 분석을 한 결과 다음과 같이 요약할 수 있다.

- allocation 계수를 산정한 결과에서 안동댐과 임하댐의 하류의 용수공급 기여도가 안동댐이 대체로 임하댐에 비해 저류용량이 크고 유입량이 많으므로 하류에 대한 용수공급배분 비율이 높은 것으로 나타났다.

- 용수공급 분석결과에서는 대체로 rule(A), rule(B), rule(C)의 순서로 하류 control point에서 부족횟수가 줄어드는 경향을 나타내는 것으로 분석되었으며, 이는 allocation rule의 적용에 rule(C)가 저류량과 유입량의 합을 댐의 평균저류량으로 나눈 비에 의해 공급량이 배분되어 안동댐과 임하댐의 각각의 저류상태와 공급능력 상태에 따라 공급량이 할당되어 상대적으로 용수공급능력이 약한 임하댐의 부족분을 보완하며, 무효방류량을 최소화하고 용수부족량의 최소화와 저류량의 효율적인 이용을 보여주는 것으로 판단된다.

- 병렬저수지 시스템의 적용에 있어서 allocation rule을 적용하여 분석한 결과 용수공급량과 저류량 상태 그리고 신뢰도 지표 분석결과에서 갈수기의 운영방안으로 DC(4)조건의 rule(C)에 의한 결과가 가장 합리적인 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

- 1) Clark Edward, J., 1950, New York control curves, *J. Am. Water Works Assoc.*, 42(9), pp.823-857.
- 2) Sharon, A. J., K. Staschus 1991, Heuristic Operating Policies for Reservoir System Simulation, *Water Resources Research*, 27(5), pp. 673-685.
- 3) J. R. L. and J. Guzman, 1999, Derived Operating Rules for Reservoirs in Series or in Parallel, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(3), pp.143-153.
- 4) 박기범, 이순탁, 2004, 가뭄기간의 저수지 운영 방안에 관한 연구, *한국환경과학회지*, 13(12), pp.1041-1048.
- 5) Tu, M. Y., 2002, Optimal of Reservoir Operation and Rule Curves by Mixed-Integer Programming., Ph. D. thesis California Univ., Los Angels.
- 6) ReVelle, C. S., E. Joeres and W. Kirby, 1969, The Linear Decision rule in Reservoir Management and Design, Development of the Stochastic Model, *Water Resources Research*, 5(4), pp.197-203.
- 7) Hashimoto, T., J. R. Stedinger and D. P. Loucks, 1982, Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria For Water Resources Sys-tem Performance Evaluation, *Water Resources Research*, 18(1), pp.14-20.
- 8) Moy, W. S., J. L. Cohon and C. S. Revelle, 1986, A programming model for analysis of the reliability, resilience and vulnerability of a water supply reservoir, *Water Resources Research*, 22(4), pp.489-498.
- 9) Votruba, L. and V. Broza, 1989, Water management in reservoirs. Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo.
- 10) Srinivasan, K., T. R. Neelakantan, N. P. Shyam and C. Nagarajukumar, 1999, Mixed-integer programming model for reservoir performance optimization., *Journal of Water Resources Planning and Management*, 25(5), pp. 298-301.
- 11) 정상만, 신현민, 1994, 다목적댐의 용수공급능력 평가방법의 개선, *한국건설기술연구원 연구보고서*, 74-WR-111.
- 12) 심명필, 이봉희, 김경탁, 1997, 저수지 물공급을 위한 신뢰도 분석에 관한 연구, *한국수자원 학회지*, 30(5), pp.527-537.
- 13) ReVelle, C. S, 1999, Optimizing Reservoir Resources Including A New Model for Reservoir Reliability, John Willy & Sons Inc., pp. 22-44.