

저수량 배분규칙을 적용한 병렬저수지 용수공급능력 해석

The Capability Analysis of Water Supply for the Parallel Reservoir System by Allocation Rules

박기범^{1,*} · 지홍기² · 이순탁³

Park Ki-bum^{1,*} · Jee Hong-Kee² · Lee Soon-Tak³

1 안동과학대학 건설정보과

2 영남대학교 건설환경공학부

3 영남대학교 건설환경공학부

(2007년 1월 19일 논문 접수; 2007년 4월 11일 최종 수정논문 채택)

Abstract

The purpose of this study was to estimate water supply reliability indices of the water supply by Allocation Rules(AR) for parallel reservoirs. Rule (A) can be considered it as only current storage, Rule(B) can be considered it as current storage and inflow and Rule (C) can be considered it as current storage, inflow and water supply capacity. First, conditions of water supply are divided by Condition I for the monthly constant water supply and Condition II for the monthly varied water supply. Second, results of allocation coefficients are revealed the smallest different at Rule (C). The analysis of water supply showed that the capability of water supply is superior to the Rule (B), it is superior to the Rule (C) on the base of the balance of water supply. The reliability analysis was highly showed at the Rule (B) and Rule (C). A methodology for the analysis of water supply was developed and applied to the parallel reservoir system from this research. The operation rule for the parallel reservoir can be slightly modified and successfully applied to the different kinds of the parallel reservoir system.

Key words: allocation rule, parallel reservoir, reliability, water supply system

주제어: 배분규칙, 병렬저수지, 신뢰도, 용수공급

1. 서론

일반적으로 저수지 운영에서 저수지 시스템을 구성하는 데에 있어 저수지의 배열상태에 따라 직렬과

병렬 구성으로 나눌 수 있으며 배열 상태에 따라 시스템의 운영방안이 달라져야 한다. 현재 국내의 저수지 운영에서는 직렬저수지에 대한 연구는 많이 이루어져왔으나 낙동강수계와 같이 병렬저수지 시스템에 대한 연구는 부족한 실정이다. 병렬저수지의 경우는

*Corresponding author Tel: +82-53-321-1517, FAX: +82-53-321-1815, E-mail: pkb5032@naver.com (Park, K.B.)

직렬저수지 운영과는 달리 각 저수지의 방류량이 하류에 독립적으로 영향을 미치므로 홍수기나 이수기에 각 저수지의 상태에 따라 연계하여 방류량을 결정하는 것이 중요하다. 특히 이수기 운영에 있어서는 각 댐의 유입량이 독립적이므로 유입량과 저류량의 상태에 따라 서로 보완하여 용수공급량을 결정할 경우 병렬저수지군의 저수량과 용수공급량이 최악의 상태가 되지 않을 위험도가 낮아질 수 있으며, 용수공급의 실패확률도 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 병렬저수지에 대한 국외의 연구로는 Sand(1984)가 병렬저수지의 용수공급최적 문제를 NYC-Rule(New York City Rule)을 이용하여 해석하였으며, Revelle(1999)는 병렬저수지에 대한 저수지의 용량과 유입량 그리고 저류량을 고려함에 따라 배분규칙을 적용하여 병렬저수지에서의 용수공급을 해석하였다.

Lund(1999) 등은 직렬저수지와 병렬저수지의 단일 목적해석에 있어 Space rule과 NYC-Rule을 이용하여 저수지의 상태를 고려한 용수공급 해석을 하였으며, Labadie(2004)는 저수지의 최적운전을 방법들을 검토하면서 병렬저수지에 대한 용수공급문제를 저수지의 상태에 따라 고려하는 방법으로 Revell(1999)가 제안한 방법 등을 언급하였다. Lund(2006) 등은 병렬저수지의 수량과 수질에 대한 해석을 유입량이 많은 시기와 적은 시기를 구분하여 최적화 모형인 LP-NYC Rule 모형을 개발하였다.

신뢰도 해석에 관한 연구로는 신뢰도 기준을 빈도 기준(Occurrence-based), 시간기준(Time-based), 양적기준(Quantity-based) 신뢰도 세 가지 관점을 기준으로 용수공급의 복원도에 관한 연구를 수행하였으며(Votruba, Broza, 1989), 용수불만족 상황으로부터 정상으로 회복되어 가는 과정을 추적하는 2개의 정수형 변수를 추가함으로써 복원도에 대한 정량화를 개선하였다(Srinivasan, 1999).

다음으로 국내에서는 정상만 등(1994) 등이 댐의 용수공급능력을 평가하기 위한 지표로서 신뢰도, 복원도, 취약도 등을 사용한 바 있다. 심명필 등(1997)은 저수지의 물 공급을 위한 신뢰도 분석에 대한 연구에서 시간, 빈도, 양적 기준 신뢰도, 복원도, 취약도 등을 유입량 자료의 통계학적 모의 발생한 후 신뢰도를 평가한 바 있다. 박기범(2005)는 병렬저수지에 대한 연계운전을 NYC-Space allocation rule을 이용

하여 용수공급능력과 신뢰도 분석을 실시하였다.

그러나 병렬저수지에 대한 용수공급문제를 저수지의 용수공급능력을 충분히 활용하기 위하여 각각의 부족분을 보충해 주는 방안으로 배분규칙을 이용한 연구는 아직 미흡하며, 연간용수공급량을 산정하는데 있어 월별 일정량 공급과 월별변화량을 고려한 것의 차이에 대한 명확한 비교가 부족하였다.

먼저, 용수공급해석에 있어 공급조건을 2가지 형태로 나누어서 분석을 하였으며 분석기준은 연간 용수공급량이 매월 일정하게 공급된다고 가정된 공급조건 I (월별 용수공급량이 일정할 경우)와 월별 변화량을 고려한 공급조건 II (월별 용수공급량의 변화를 고려한 경우)에 따라 Rule(A)~Rule(C)에 따른 병렬저수지의 배분계수의 변화에 따른 용수공급능력과 신뢰성에 어느 정도 영향이 있는가를 판단하기 위한 분석을 실시하였다. 그리고 저수지 운영방안의 의사결정에 지표가 될 수 있는 신뢰도 평가지표들을 비교하여 효율적인 방안을 모색하는 것을 목적으로 하였다.

본 연구에서는 낙동강 수계의 병렬저수지 시스템으로 구성된 안동댐과 임하댐에 배분규칙을 실용성 있도록 수정한 시스템을 구성하여 국내의 병렬저수지 시스템에 적용성을 검토하고 다목적댐의 용수공급 목표 신뢰도인 95%의 신뢰도를 최대한 만족시키며 하류의 용수공급부족이 최소화 하여 병렬저수지의 특성을 반영하도록 모색하였다.

2. 배분규칙과 신뢰도의 기본이론

2.1. 배분규칙의 기본이론

하천유역에 병렬구조를 가진 서로 독립적인 저수지들이 하류지역의 용수공급에 있어서 기여할 수 있는 방안으로 유입량과 저류량 상태에 따른 용수공급 방안인 배분규칙을 제시하였으며, 여기서 저수지 시스템의 용수부족량을 최소화 하는 방법에는 두 가지 다른 개념과 접근방법으로 분류할 수 있다. 첫 번째로 동일 기간의 조절점에서의 각 저수지에서 공급한 양의 비율에 따라 배분할 수 있으며, 각월의 공급량의 비율에 따라 각월에 대해 배분비율이 계산할 수 있다. 두 번째로 저수지시스템의 상태에 영향을 주는 변수들, 즉 유입량과 저수량 상태와 다른 저수지의 유입량과 저수량 상태의 비율에 따라 공급량 배분비

율을 결정할 수 있다.

병렬저수지에 배분 규칙을 적용하여 배분 비율을 산정하는 데에 있어 저수지의 요구되는 용수공급량의 배분을 각 저수지의 저류량과 유입량의 비율을 고려하여 저수지의 방류량을 결정할 수 있다. 병렬저수지의 용수공급문제에 있어서 하류에 공급되는 용수공급량은 다음 식 (1)~(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$O_{1t} = S_{1t} + Ip_{1t} - S_{1,t+1} - SO_{1t} \quad (1)$$

$$O_{2t} = S_{2t} + Ip_{2t} - S_{2,t+1} - SO_{2t} \quad (2)$$

$$DO_t = O_{1t} + O_{2t} \quad (3)$$

여기서 S_{1t} , S_{2t} 는 각 저수지, t 월의 저류량, $S_{1,t+1}$ 은 $t+1$ 월의 저류량이다. 그리고 Ip_t 는 t 월의 유입량, O_t 는 하류로 공급하는 용수공급량, SO_t 는 무효방류량, DO_t 는 하류 용수공급량이다.

병렬저수지의 용수공급 해석에 있어 각 저수지의 저류상태에 따른 용수공급을 조절함으로써 보다 효율적인 용수공급이 가능하게 된다. 따라서 본 연구에서는 Revelle(1999)이 제안한 배분규칙을 실용적으로 수정하여 안동댐과 임하댐에 적용할 수 있는 모형을 구성하였다. Rule(A)는 각 댐의 저수량만을 고려하여 배분계수를 산정하는 방법이며, Rule(B)는 댐의 저수량과 유입량을 고려한 방법이다. Rule(C)의 경우는 댐의 저수량과 유입량의 합을 총 저수용량으로 나누어 배분계수를 산정함으로써 댐의 크기와 유역면적의 크기에 따른 문제점을 보완한 식으로 다음 식 (4)~(6)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Rule(A)} \quad x &= \left[\frac{s-1}{\sum_{j=1}^2 s_{jt-1}} \right] \times D_i \\ &= AC_{Ai} \times D_i \quad i = 1, 2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Rule(B)} \quad x_{it} &= \left[\frac{s_{it-1} + Ip_{it}}{\sum_{j=1}^2 (s_{jt} + Ip_{jt})} \right] \times D_i \\ &= AC_{Bi} \times D_i \quad i = 1, 2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Rule(C)} \quad x_{it} &= \left[\frac{(s_{it} + Ip_{it})/c_i}{\sum_{j=1}^2 (s_{jt-1} + Ip_{jt})/c_j} \right] \times D_i \\ &= AC_{Ci} \times D_i \quad i = 1, 2 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 x_{it} 는 t 월의 저수지 i 의 용수공급량, s_{it} 는 t 월 말의 저수지 i 의 저류량, s_{t+1} 은 전월의 저수지 저류량이며, Ip_{it} 은 t 월의 저수지 i 의 유입량, c_i 는 저수지 i 의 총 저류용량, 마지막으로 D_i 는 각월의 계획공급량, AC_i 는 배분계수, D_i 는 계획용수공급량이다. 본 연구에서는 위 식 (4)~(6)을 안동댐과 임하댐의 병렬저수지 시스템에 적용하여 다음과 같은 모형으로 수정하여 구성하였다.

$$S_{1,t+1} = S_{1t} + Ip_{1t} - x_{1t} - SO_{1t} \quad (7)$$

$$S_{2,t+1} = S_{2t} + Ip_{2t} - x_{2t} - SO_{2t} \quad (8)$$

$$DO_t = x_{1t} + x_{2t} \quad (9)$$

본 연구에서는 실용성을 고려하여 관측 자료를 이용하여 t 월에 유입량을 사용하였다. 그리고 Rule(A)~(C)의 각 방법에 대하여 용수공급량 x_{it} 으로 식 (7)~(9)를 이용하여 연계운영 모형을 구성하였다.

2.2. 용수공급 신뢰도 평가지표

일반적으로 용수공급 신뢰도 평가지표는 Hashimoto et al.(1982)과 국내에서는 심명필 등(1997)이 신뢰도, 복원도 및 취약도의 측면에서 저수지의 용수공급능력을 해석하였으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

일반적인 신뢰도 분석에서는 신뢰도(α)는 주어진 계획기간 동안 시스템이 정상적으로 용수공급을 수행할 확률로 정의되며, 다음 식(10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha = \text{Prob} [X_t \in S] \quad (10)$$

α 는 신뢰도, X_t 는 시간에 따른 용수공급량의 변수이며 S 는 용수수요의 충족상태이다. 식 (10)에서 α 로 표시한 신뢰도와 대응하는 개념인 위험도 β 는 임의

시점 t 에서 용수공급량이 용수수요를 충족시키지 못한 확률로 정의할 수 있으며, 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\beta = \text{Prob} [X_t \in F] = 1 - \text{Prob} [X_t \in S] = 1 - \alpha \quad (11)$$

β 는 위험도, F 는 용수부족 상태이다. 수자원 시스템의 설계 및 운영에 대한 신뢰도 분석에 사용되는 기준은 크게 총 분석기간에 대한 부족발생 기간의 비로 나타내는 빈도 기준신뢰도, 용수공급량에 대한 부족량의 비로 나타내는 양적 기준신뢰도로 구분할 수 있다. 또한 용수공급 부족이 발생한 후 얼마나 빨리 정상상태로 회복되는가를 나타내는 개념으로 사용되는 것이 복원도(γ)이다. 저수지 시스템에 있어서 용수공급량이 수요량을 충족시키지 못하여 용수부족이 발생할 경우 용수부족이 얼마나 오래 지속될 것인가를 나타내는 평가 척도로 사용될 수 있으며, 식 (12)와 같이 표현할 수 있다. 복원도는 1에 가까울수록 부족이 발생한 후 빨리 정상상태로 회복된다. 단 여기서 용수부족이 발생하는 기간은 1보다 크거나 같다.

$$\gamma = E [T_F] \quad (12)$$

T_F 는 시스템 파괴 발생 후 파괴상태의 지속기간, $E [T_F] = T_F$ 의 기대치로서 시스템 파괴상태의 평균지속기간 즉, 용수부족의 평균지속시간이다. 또한, 용수부족사상이 발생하여 다시 정상상태로 되돌아오는 것을 상태변환, 마지막으로 취약도(δ)는 용수부족의 상태의 결과가 얼마나 심각할 것인가를 나타내는 척도로서 발생 가능한 용수부족량을 의미한다. 복원도와 더불어 저수지 용수부족상태의 결과를 나타내는 지표로 사용된다. 용수공급시스템의 취약도를 나타내는 정량적인 지표는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \sum_{j \in F} s_j p_j \quad (13)$$

s_j 는 j 번째 사상에서 시스템이 얼마나 파괴되었는가를 나타내는 용수부족량이고, p_j 는 시스템 파괴상태에서 s_j 에 상응하는 용수부족량이 발생할 확률이다. 본 연구에서는 취약도 산정에서 용수부족기간동안의

평균용수부족량을 산정한 후 용수부족확률(빈도기준, 양적기준)의 위험도를 곱한 것을 취약도로 산정하여 용수부족 발생 시 부족량으로 나타내었으며, 식 (14)와 같다.

$$\delta = \sum_{j \in F} \bar{s}_j \beta_j \quad (14)$$

여기서 \bar{s}_j 는 평균용수부족량이고 β_j 는 용수부족이 발생할 확률의 위험도이다.

3. 배분규칙모형의 구성 및 적용분석

3.1. 저수지 연계운영 시스템 구성 및 모형의 정식화

배분규칙 모형을 적용하기 위한 병렬저수지 시스템의 구성은 분석자료 취득의 용이성과 자료의 수를 줄이기 위하여 분석기간을 각 월을 단위로 하여 저수지 조작과 각 댐의 시·공간적인 저수지 상태를 고려하여야 한다. 그리고 각월의 유입량 분석을 하여 각월 유입량의 통계적인 특성을 파악하고 비 홍수기에 대한 유입량의 특성을 분석하여 병렬저수지 시스템에서 공급량 배분 비율을 산정하였다.

기존댐 용수공급능력평가(낙동강 수계, 건설교통부, 한국수자원공사, 1998)에서 조사한 자료에 의하면, 안동다목적댐의 용수공급능력은 $926 \times 10^6 \text{m}^3/\text{년}$ 으로 조사되었으며, 임하댐의 용수공급능력은 $592 \times 10^6 \text{m}^3/\text{년}$ 로 조사되었다. 안동댐과 임하댐에 대한 주요 제원을 요약하면 다음 Table 1과 같다.

Fig. 1은 댐의 일반적인 용량배분도이며 Fig. 2는 안동댐과 임하댐의 연계운영 시스템의 구성도이다. 여기서 $ADI(t)$, $IHI(t)$ 는 안동댐과 임하댐의 유입량이고, $ADS(t)$, $IHS(t)$ 는 안동댐과 임하댐의 저류량, $ADD(t)$, $IHD(t)$ 는 안동댐과 임하댐의 용수공급량이고, $ADO(t)$, $IHO(t)$ 는 안동댐과 임하댐의 무효방류량이다.

3.2. 모형의 입력자료 및 제약조건

안동댐과 임하댐 연계운영을 위한 배분규칙 모형의 입력 자료와 제약조건을 다음과 같이 설정하였다. 먼저 안동댐과 임하댐의 월별 유입량과 저수지의 수위-저류량 곡선 그리고 용수공급 계획량을 수집하였

Table 1. Dam Characteristics

Classifications	Units	Andong	Imha
Dam crest level	EL.m	166.0	168.0
Highest water level	EL.m	163.9	165.8
Flood water level	EL.m	161.7	164.7
Normal high water level	EL.m	160.0	163.0
Flood limit level	EL.m	160.0	154.0
Low water level	EL.m	130.0	137.0
Flood control volume	EL.m	110.0	80.0
Project Flood	m ³ /s	4,500 (100yr)	4,600 (200yr×1.2)
P.M.F	m ³ /s	8,350	7,500
Water supply	10 ⁶ m ³	926	592

주: 기존댐 용수공급능력조사 보고서(한국수자원공사, 1998)

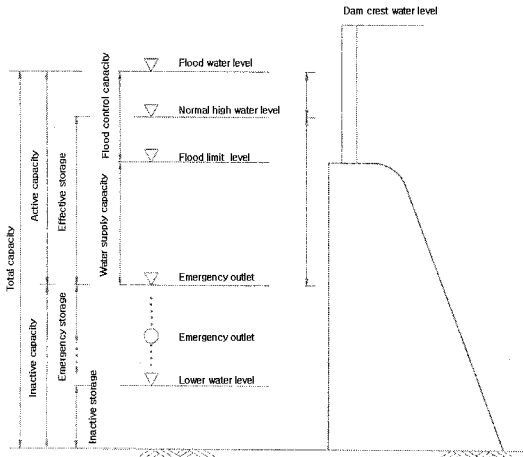


Fig. 1. Reservoir storage zone and index levels.

다. 유입량자료의 통계분석을 위하여 관측 자료를 수집하여 안동댐은 1977~2003년까지의 유입량 자료를 분석하였으며, 임하댐은 1992년 7월~2003년 6월까지의 유입량 자료를 분석한 결과 안동댐의 월평균 유입량은 32.41m³/s이었으며, 임하댐의 경우는 23.70 m³/s이었다. 그리고 10월부터 6월까지의 비 홍수기 유입량의 평균이 안동댐의 경우 16.95m³/s이었으며, 임하댐의 경우 11.05m³/s이었다. 두 댐의 연계운전을 위하여 동일한 자료기간이 공존하는 1992년 7월부터 2003년 자료를 용수공급해석과 신뢰도 분석을 실시하기 위한 저수지운영의 입력 자료로 사용하였다.

안동댐의 유입량에 대한 통계분석결과를 살펴보면 풍수기인 7~9월에 총유입량의 61% 정도가 유입되는 것으로 분석되었다. 임하댐의 유입량에 대한 통계 분석결과에서는 풍수기인 7월, 8월 및 9월에 총유입

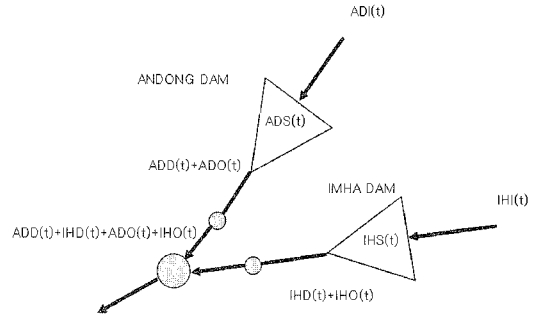
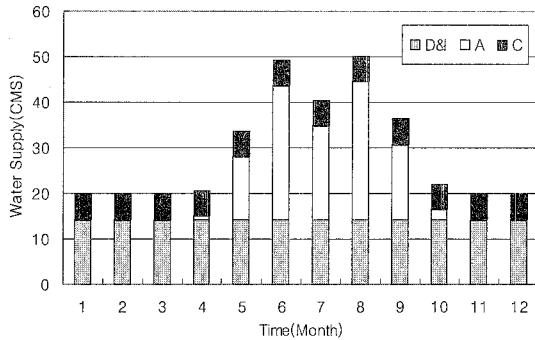


Fig. 2. Andong-Imha Parallel Dam system.

량의 65% 정도가 유입되는 것으로 안동댐보다 임하댐이 풍수기에 유입되는 비중이 큰 것으로 분석되었다. 안동댐과 임하댐의 경우 비 홍수기 유입량이 평균유입량의 각각 52.3%, 46.6% 정도로 나타났다.

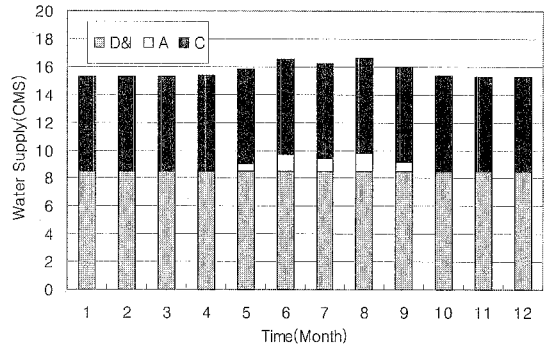
배분규칙을 적용하기 위한 제약조건의 설정은 다음 Table 2와 같으며, 제약조건을 살펴보면 안동댐과 임하댐에 적용된 초기 조건은 초기 저류량을 상시 만수량으로 하였으며, 안동댐과 임하댐의 상한 제약조건은 상시 만수량으로 하여 상시 만수량 이상은 방류가 되도록 하였다. 또한 하한 제약조건은 사수량으로 하였다. 댐의 저류량-수위 공식이 수위별로 구분되어 유도되어 있으나 본 연구에서는 입력자료의 일관성을 위하여 수위-저류량 자료를 Curve expert 프로그램을 이용하여 하나의 식으로 유도하였다.

$$S = \frac{8856.868 + 413.833b^{0.447992}}{93.97508 + b^{0.447992}} \quad (15)$$



D&I: Domestic and Industrial A: Agriculture C: Conservation Flow
 출처: 기존댐 용수공급능력 조사(낙동강 수계)보고서(건설교통부, 한국수자원공사, 1998)

Fig. 3. Monthly water supply plan(Andong dam).



D&I: Domestic and Industrial A: Agriculture C: Conservation Flow
 출처: 기존댐 용수공급능력 조사(낙동강 수계)보고서(건설교통부, 한국수자원공사, 1998)

Fig. 4. Monthly water supply plan(Imha dam).

Table 2. Constrains of Allocation rule

Classifications	Andong dam	Imha dam
Initial Conditions	Normal pool storage	Normal pool storage
Lower Constraints	Dead storage	Dead storage
Upper Constraints	Normal pool storage	Normal pool storage
Constraints	1) Outflow>0 2) ADD(t)=ADPD(t) for t=7,8,9month	1) Outflow>0 2) IHD(t)=IHPD(t) for t=7,8,9month
Outflow Constraints	1) Storage Conditions IF Normal pool storage < Storage(t) THEN Outflow = Storage(t) - Normal pool storage ENDIF 2) Outflow Conditions IF ADS(t)+ADI(t)-ADPD(t)-ADSD>0 AND IHS(t)+IHI(t)-IHPD(t)- IHSD > 0 THEN ADD(t)=ADPD(t) IF NOT ADD(t)=(ADI(t)+IHI(t)) AC ENDIF	1) Storage Conditions IF Normal pool storage < Storage(t) THEN Outflow = Storage(t) - Normal pool storage ENDIF 2) Outflow Conditions IF IHS(t)+IHI(t)-IHPD(t)- IHSD > 0 AND ADS(t)+ADI(t)-ADPD(t)-ADSD > 0 THEN IHD(t)=IHPD(t) IF NOT IHD(t)=(ADI(t)+IHI(t)) (1-AC) ENDIF

$$S = 223.5819 - 118.92089e^{(-0.027437t/0.507685)} \quad (16)$$

그리고 안동댐과 임하댐의 방류량 제약조건으로 방류량은 항상 0보다 커야하는 것으로 설정하였으며, 7월, 8월 및 9월은 용수요구량을 100% 공급하는 것으로 설정하였다. 안동댐과 임하댐의 용수공급계획량이 연간 용수공급계획량 926x106m³, 497x106m³을 매월 일정한 양으로 공급할 경우 즉 안동댐과 임하댐의 용수요구량을 유지용수를 포함한 각각 29.16m³/s, 15.76m³/s로 하였다. 그리고 월별 용수공급량의 변화

를 고려한 경우는 Fig. 3, Fig. 4과 같이 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.

여기서, ADPD, IHPD는 안동댐과 임하댐의 계획용수공급량, ADSD, IHSD는 안동댐과 임하댐의 하한 저류량, ADD, IHD는 용수공급량, AC는 식(4)~(6)에 의해 산정된 배분계수이다. 안동댐의 저

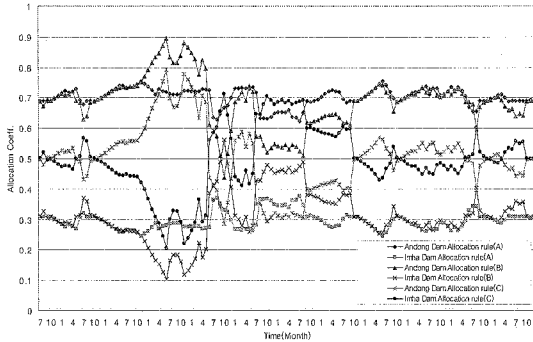


Fig. 5. Comparison of allocation coefficients (Condition I).

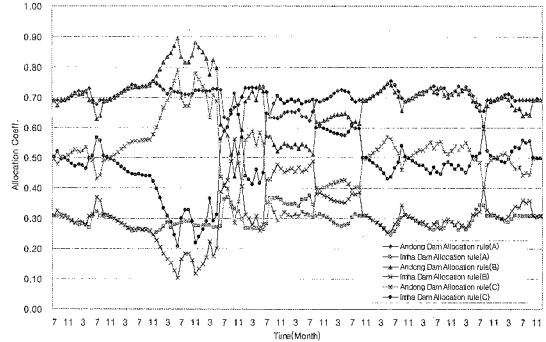


Fig. 6. Comparison of allocation coefficients (Condition II).

류량 제약조건은 t 월의 저류량이 상시만수위를 넘으면 상시만수위까지 방류하도록 하였으며, 방류량 조건에서는 댐의 t 월의 저류량과 유입량의 합이 안동댐의 하한 저류량과 계획공급량의 합의 차이가 0보다 크고 임하댐의 저류상태가 안동댐의 상태와 동일하다면 계획방류량을 공급하도록 하였으며, 0보다 적을 경우 안동댐 유입량과 임하댐의 유입량의 합에 배분계수를 곱한 양을 방류하도록 하였다.

4. 모형의 적용 및 분석결과

본 연구의 안동댐과 임하댐의 배분 규칙을 적용한 병렬저수지 연계운영에서 (월별 용수공급량이 일정한 경우)와 공급조건 II (월별 공급계획량의 변화를 고려하였을 경우)에 대하여 안동댐과 임하댐의 배분계수의 산정과 저수지의 저류량 상태 및 용수공급의 신뢰도 지표들을 비교하였다.

4.1. 배분규칙에 의한 공급배분율 산정결과 비교

안동댐과 임하댐의 용수공급량 배분을 위한 배분계수를 산정한 결과 배분 계수의 산정결과에서 댐의 유입량과 t 월의 저류량의 합을 저수지 총 용적으로 나눈 것에 대해서 고려한 Rule(C)의 경우가 안동댐과 임하댐의 공급배분비율이 대등한 것으로 분석되었으나, Rule(A)와 Rule(B)의 경우 댐의 저류량과 유입량이 큰 댐일수록 기여도가 크게 나타나는 경향이 있다.

공급조건 II의 경우에서도 공급조건 I과 마찬가지로 Rule(A)와 Rule(B)는 저류량 비와 저류량과 유입량의 비에 의해 배분 비율이 결정되어 상대적으로

저류량이 큰 안동댐의 배분계수 값이 크게 분석되었다. Rule(C)의 경우 갈수기에는 안동댐의 의존도가 높아지나 전체 분석기간에서는 공급가능 용량 비에 따라 균형적인 공급비율을 보여주는 것으로 나타났다. 공급조건에 따른 배분 계수의 변화는 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

병렬저수지 연계운영의 경우 각각의 저수지의 유입량과 저류상태에 따라 공급하여야 할 공급량을 상호보완적으로 공급을 하여 어느 한 저수지의 저류상태가 악화되지 않도록 하기 위해서는 전체 공급량에 대한 각각의 댐이 공급할 수 있는 공급 가능량의 비에 따른 배분 방법인 Rule(C)의 경우가 가장 균형적인 배분방법으로 판단된다.

4.2. 용수공급 분석결과 비교

본 연구에서 공급조건 I의 경우 Rule(A), Rule(B) 및 Rule(C)을 적용하여 안동댐과 임하댐의 연계운영 분석결과 하류 제어지점을 기준으로 용수부족횟수는 Rule(B)가 가장 적게 발생하는 것으로 분석되었으며, 용수부족량은 Rule(C)가 가장 적게 나타났다. Table 3과 Table 4에서 Rule(C)의 경우 용수부족량은 Rule(A) 및 Rule(B)에 비해 적게 발생하면서 평균 저류량은 크게 차이가 나지 않는 것으로 분석되어 상대적으로 안동댐과 임하댐이 상호보완적으로 용수공급이 이루어졌다고 볼 수 있으며, 분석방법에서도 공급조건 I보다는 공급조건 II가 용수공급해석 측면에서는 우수한 결과를 얻을 수 있는 것으로 판단된다. 용수공급량의 특성을 분석한 결과 공급조건 I보다 공급조건 II에서 Rule(C)를 적용한 경우가 용수부족은 최소로 발생시키는 결과를 나타내었다.

Table 3. Comparison of storage

Classifications		Condition I			Condition II		
		Rule(A)	Rule(B)	Rule(C)	Rule(A)	Rule(B)	Rule(C)
Ave.	Andong	773.57	773.35	756.34	802.84	805.42	788.20
	Imha	351.15	350.10	346.27	349.99	352.88	347.61
Var.	Andong	118,160.50	118,288.27	126,811.23	126,131.81	124,524.66	135,291.22
	Imha	27,444.07	27,240.06	28,368.38	28,262.75	26,891.03	28,687.67
Std.	Andong	343.74	343.93	356.11	355.15	352.88	367.82
	Imha	165.66	165.05	168.43	168.12	163.98	163.37
Max	Andong	1,224.02	1,224.02	1,224.02	1,224.02	1,224.02	1,224.02
	Imha	548.19	548.19	548.19	548.19	548.19	548.19
Min	Andong	115.70	112.22	57.57	117.85	128.43	74.99
	Imha	46.70	40.68	21.91	38.50	41.50	14.99

(단위: 10⁶m³)

Table 4. Comparison of water supply results

Classifications		Condition I			Condition II		
		Rule(A)	Rule(B)	Rule(C)	Rule(A)	Rule(B)	Rule(C)
Water supply	Andong	7	7	6	5	5	6
Deficits No.	Imha	12	10	12	11	10	11
(Months)	Control point	15	14	14	14	13	14
Water supply	Andong	363.58	362.96	296.84	200.45	211.04	130.52
Deficits	Imha	376.24	361.05	342.28	346.43	348.50	322.00
(10 ⁶ m ³)	Control point	739.82	724.01	639.12	546.88	559.54	452.52
Ave. storage	Andong	773.57	773.35	756.34	803.21	805.79	788.20
(10 ⁶ m ³ /mon)	Imha	351.15	350.10	346.27	350.28	353.17	347.61
Ave. water	Andong	147.42	147.41	146.62	148.31	148.28	147.49
level(EL. m)	Imha	151.56	151.54	151.10	151.50	151.77	151.13

배분규칙을 이용한 안동댐과 임하댐의 용수공급 분석결과에 대하여 신뢰도 평가를 실시한 결과 Table 5에 정리한 바와 같이 신뢰도 자료들의 분석결과 전체적으로 다목적댐의 용수공급 신뢰도 목표치인 95%를 합류점 기준에서 만족하는 것으로 나타났으며, 단일 댐의 신뢰도는 임하댐에서 95%를 충족시키지 못하는 것으로 분석되었다. 신뢰도 측면에서 Rule(B)의 경우 빈도, 양적 신뢰도 측면에서 전체적으로 우수한 것으로 나타났다. 빈도기준의 신뢰도가 양적 신뢰도 보다 낮은 이유는 0.1이 부족이 발생하여도 부족횟수는 1이 되나 양적기준의 경우는 부족한 양만큼의 신뢰도 이므로 일반적으로 빈도기준 신뢰도 보다는 양적기준 신뢰도가 크게 나타나며, 신뢰도 분석의 해석

에 있어 빈도기준만으로 신뢰도 평가는 용수공급해석의 과소평가가 이루어질 수 있다.

복원도, 평균부족량과 취약도에서는 Rule(B)가 전체적으로 우수한 것으로 나타나 신뢰도 분석 결과에서는 Rule(B)의 결과가 우수한 것으로 나타났다. Rule(C)의 복원도와 취약도의 결과에서 전체적으로 용수부족시 그 심도가 크게 나타나며 부족기간도 상대적으로 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 용수부족량을 고려한 경우 Rule(C)의 배분 계수에 따른 용수공급 배분을 하여 운영결과에서 용수공급량이 최대가 되면서도 적은 용수부족량을 발생시키는 것으로 분석되었다.

배분 규칙을 이용하여 안동댐과 임하댐의 용수공

Table 5. Comparison of reliability results

Indices		Condition I			Condition II		
		Rule(A)	Rule(B)	Rule(C)	Rule(A)	Rule(B)	Rule(C)
Frequency(%)	Andong	95	95	96	96	96	96
	Imha	91	93	91	92	93	92
	Control point	89	90	90	90	91	90
Quantity(%)	Andong	97	97	97	98	98	99
	Imha	93	94	94	94	94	94
	Control point	95	96	96	97	97	97
Resikency	Andong	2.33	2.33	5.88	5.00	5.00	5.03
	Imha	4.00	2.50	4.00	2.78	2.50	2.18
	Control point	5.00	3.45	4.76	3.45	3.23	3.45
Ave. water supply deficits (10 ⁶ m ³)	Andong	16.82	16.51	37.53	31.19	25.90	23.72
	Imha	19.67	6.27	25.33	12.01	6.76	15.07
	Control point	63.96	59.51	72.52	56.39	58.23	60.18
Vulnerability	Andong	0.86	0.84	1.64	1.14	0.95	1.04
	Imha	1.72	0.46	2.22	0.96	0.49	1.21
	Control point	7.00	6.08	7.41	5.76	5.53	6.15

급 분석결과 Rule(B)의 경우는 공급조건 I와 공급조건 II의 신뢰도 지표는 우수한 것으로 나타났으며, 그러나 병렬저수지의 운영의 특성을 최대한 반영하고 장점을 극대화 시키는 측면에서 배분비율이 어느 한 쪽에 과중되지 않도록 배분되며 안동댐과 임하댐의 평균저류량의 차가 가장 작아지는 점에서는 Rule(C)의 경우가 균형적인 배분측면에서 우수하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 낙동강 유역에 병렬 구조를 가진 안동댐과 임하댐에 대하여 배분 규칙을 적용하여 용수 공급 해석과 신뢰도 지표들을 산정하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 용수공급 조건을 구분하여 분석한 결과에서 공급조건 I (월별 용수공급량이 일정한 경우)와 공급조건 II (월별 용수공급량의 변화를 고려한 경우)에서 배분계수의 차이는 크게 나지 않는 것으로 분석이 되었다. Rule(C)의 경우는 저류량과 유입량의 합을 댐의 평균 저류량으로 나눈 비에 의해 공급량이 배분되는 방법으로 안동댐과 임하댐의 각각의 저류상태와 공급능력 상태에 따라 공급량이 배분되어 용수 부족

량을 상호 보완하는 측면에서 배분계수의 배분이 가장 균형적으로 나타남으로써 병렬저수지의 상호보완적으로 균형적인 운영이 이루어진 것으로 판단되었다.

2) 저류량 분석결과에서 평균 저류량을 살펴보면 안동댐의 경우 임하댐과 비교 결과 공급조건 II의 분석결과에서 평균 저류량이 높게 나타나는 것으로 분석되었다. 용수공급량의 결과에서는 안동댐의 경우 임하댐과 비교하여 공급조건 II의 분석결과가 공급조건 I와 비교하여 30% 감소하는 것으로 분석되었다.

3) 신뢰도 분석결과에서 Rule(A), Rule(B) 및 Rule(C)에서 빈도기준 신뢰도, 양적기준 신뢰도 및 평균 부족량 등이 공급조건 I보다 공급조건 II에서 높게 산정되었다. 전체적으로 용수공급의 신뢰도 분석측면에서는 Rule(B)가 우수하게 나타났으나, 병렬저수지의 용수의 균형적인 배분 측면에서는 Rule(C)가 우수한 것으로 나타났다.

4) 본 연구에서는 Revelle(1999)의 연구내용을 국내 병렬저수지에 적용성을 검토하고 용수공급해석을 실시하여 신뢰도 분석을 하여 과거 다목적 댐의 용수공급해석에 있어 공급량의 변화를 고려하거나 고려하지 않는 방안에 대해서 검토와 병렬저수지의 상호보완하여 용수공급을 할 수 있는 방안을 검토하였다.

실제 댐운영에서는 댐 유입량을 예측하고 이를 이를 이용하여 예측하고 물공급 예측에 따른 계획을 수립하고 있으므로, 추후 연구에서 유입량 예측에 따른 확률적 모형을 결합한 위험도 해석과 분석기간을 순별 또는 일별 저수지 모의운영이 연계하여 운영될 수 있는 국내 적용 모형의 개발 또한 필요할 것이다.

참고문헌

1. 정상만, 신현민 (1994) 다목적댐의 용수공급능력 평가 방법의 개선. 한국건설기술연구원 연구보고서, 74-WR-111.
2. 심명필, 이봉희, 김경탁(1997) 저수지 물공급을 위한 신뢰도 분석에 관한 연구. 한국수자원학회 논문집, 30(5) pp. 527-537.
3. 건설교통부, 한국수자원공사 (1998) 낙동강수계 기존댐 용수공급능력평가 보고서.
4. 한국수자원공사 (2003) 수자원 관리종합 정보시스템, <http://wamis.go.kr/>
5. 박기범, 이순탁 (2005) NYC-Allocation Rule을 이용한 병렬저수지 연계운영. 한국환경과학회지, 14(6), pp. 533-542.
6. Hashimoto, T., Stedinger, J.R., and Loucks, D.P. (1982) Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria For Water Resources System Performance Evaluation. *Water Resour. Res.*, 18(1), pp. 14-20.
7. Sand G.M.(1984) *An analytical investigation of water supply reservoir in parallel*, Ph. D. thesis, Cornell Univ., Ithaca, N.Y.
8. Vortruba L., and Broza V. (1989) *Water management in reservoirs*, Elsevier, Amsterdam-Oxford-NewYork-Tokyo.
9. Revelle, C.S. (1999) *Optimizing Reservoir Resources Including A New Model for Reservoir Reliability*, John Willy & Sons Inc.
10. Srinivasan, K., Neelakantan, T.R., Narayan, P.S., and Nagarajukumar, C.(1999) Mixed-integer programming model for reservoir performance optimization., *J, Water Resour. Plan. and Mang., ASCE*, 25(5), pp. 298-301.
11. Jay R. Lund, Joel Guzman (1999), Some Drive Operating Rules for Reservoirs in Series or in Parallel, *J, Water Resour. Plan. and Mang., ASCE*, 125(3), pp. 143-153.
12. Labadie, J. (2004), Optimal operation of multireservoir system: State-of-the-art review, *J, Water Resour. Plan. and Mang., ASCE*, 130(2), pp. 93-111.
13. Javier Paredes and Jay R. Lund (2006) Refill and Drawdown Rules for Parallel Reservoirs: Quantity and Quality, *Water Resources Management* 20, pp. 359-376.