Goal Programming을 이용한 홍수기 저수지 최적 운영

Optimal Reservoir Operation Using Goal Programming for Flood Season

김혜진* · 안재황** · 최창원*** · 이재응****

Kim, Hye Jin · Ahn, Jae Hwang · Choi, Changwon · Yi, Jaeung

Abstract

The purpose of multipurpose reservoir operation in flood season is to reduce the peak flood at a control point by utilizing flood control storage or to minimize flood damage by controlling release and release time. Therefore, the most important thing in reservoir operation for flood season is to determine the optimal release and release time. In this study, goal programming is used for the optimal reservoir operation in flood season. The goal programming minimizes a sum of deviation from the target value using linear programming or nonlinear programming to obtain the optimal alternative for the problem with more than two objectives. To analyze the applicability of goal programming, the historical storm data are utilized. The goal programming is applied to the reservoir system operation as well as single reservoir operation. Chungju reservoir is selected for single reservoir operation and Andong and Imha reservoirs are selected for reservoir system operation. The result of goal programming is compared with that of HEC-5. As a result, it was found that goal programming could maintain the reservoir level within flood control level at the end of a flood season and also maintain flood discharge within a design flood at a control point for each time step. The goal programming operation is different from the real operation in the sense that all inflows are assumed to be given in advance. However, flood at a control point can be reduced by calculating the optimal release and optimal release time using suitable constraints and flood forecasting system.

Key words : goal programming, multipurpose dam, optimal reservoir operation, multiobjective programming

요 지

홍수기 다목적댐 운영의 목적은 홍수조절용량을 최대한 이용하여 하류 주요 지점의 침투홍수량을 저감시키거나, 계획홍수량을 초과하지 않도록 방류량과 방류시점을 조절함으로써 홍수피해규모를 최소화하는 것이다. 따라서 홍수기 다목적댐 운영에 있어 가장 중요한 것은 최적의 방류시점과 방류량의 결정이며 이를 통해 홍수기말 이수용량을 최대화 하는 점이다. 본 연구에서는 다목적 최적화기법의 하나인 goal programming을 이용하여 홍수기 저수지 최적운영을 실시하였다. goal programming은 선형계획법 또는 비선형계획법을 이용하여 두 개 이상의 목적을 가진 문제의 최적 대안을 구하기 위해, 목표값으로부터의 편차의 합을 최소화하여 최적화하는 기법이다. 홍수기 다목적댐 운영에서 goal programming의 적용성을 검토하기 위해 실제 홍수시상을 이용하여, 단일저수지 운영과 저수지 연계운영을 실시하였다. 단일저수지 운영을 적용하기 위한 시험유역으로는 충주댐 유역을 선정하였고 저수지 연계운영을 적용하기 위한 시험유역으로는 안동댐과 임하댐 유역을 선정하였다. goal programming의 결과 분석을 위해 저수지 모의운영 모형인 HEC-5 모형의 결과와 비교, 분석하였다. 검토 결과 goal programming을 이용할 경우 홍수기 말에 저수지 수위를 홍수기제한수위로 유지할 수 있었으며 주요 지점의 홍수량을 매 시간 적절히 계획홍수량 아래로 유지할 수 있었다. goal programming을 이용한 최적 운영의 경우 전 구간의 유입량을 알고 있다고 가정한 점에서 실제 저수지 운영과는 차이가 있으나, 적절한 제약조건을 적용하고 홍수예경보를 이용하여 예보된 유입량을 활용하면 최적의 방류량 시점과 방류량을 산정하여 홍수기 다목적댐을 효율적으로 운영할 수 있으며 주요 지점의 홍수량도 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : goal programming, 다목적댐, 저수지 최적운영, 다목적최적화

*아주대학교 건설교통공학과 석사과정 (E-mail : hjhy321@ajou.ac.kr)

**아주대학교 건설교통공학과 석사과정

***아주대학교 건설교통공학과 박사과정

****아주대학교 환경건설교통공학부 교수 (교신저자)

1. 서 론

우리나라의 다목적댐은 연평균강수량의 약 70%가 발생하는 7월~9월의 홍수기에는 홍수조절 목적을 위해 운영되고, 그 외의 기간에는 주로 원활한 용수공급과 수력발전을 위해 운영되고 있다. 다목적댐의 운영은 이수과 치수를 고려한 수자원의 효율적인 분배와 운영이 이루어져야 한다. 따라서 다목적댐은 이수 혹은 치수의 관점에서 미리 정해진 저수지 운영률 또는 최적화기법 등을 이용하여 운영한다. 최적화 기법은 선형계획기법(linear programming, LP), 동적계획기법(dynamic programming, DP), 비선형계획기법(nonlinear programming, NLP) 등이 있으며 모의기법으로는 HEC-5 등이 주로 이용되고 있다.

저수지 최적화기법에 대한 연구는 단일 저수지운영에 대한 운영률 개발에 대한 연구(Raudkivi, 1979)를 비롯하여 댐군 연계운영에 최적화기법을 이용하여 수행한 연구(Ignizio, 1982) 등 많은 연구가 있다. 특히 Yeh(1985)를 비롯하여 Wurbs(1993), Labadie(2004) 등은 기존 연구에 대한 광범위한 조사를 통해 저수지 운영에 이용된 기법들의 장·단점을 검토하였다. 최근에는 최적화기법 외에도 fuzzy 기법(Xu 등, 2011)과 같은 heuristic 기법들도 저수지 운영에 적용되고 있다.

비선형계획법의 경우 Murray 등(1979)이 지적한 바와 같이 시스템의 동적 구조를 무시하고 제약조건을 정책함수로 반영시키는데 어려움이 존재한다. 따라서 경사투영법과 공역경사법 등이 개발되었으나 여전히 연산시간이 긴 것과 전영역 최적해를 보장하지 못한다는 것이 단점이다. 동적계획기법은 수지원 시스템의 비선형성과 추계학적 특성을 표현한다는 장점을 가지고 있으나, 차원이 증가함에 따라 계산량이 기하학적으로 증가한다는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 goal programming은 제공된 특성치를 이용하여 두 개 이상의 목적을 포함한 목적함수에 적합한 최적해를 찾을 수 있으며, 연산시간이 짧고 전영역 최적해를 보장하면서 유연한 제약조건을 이용하여 최적해에 대한 조건을 달리 하여 검토, 비교할 수 있다는 장점이 있다.

국외에서는 다양한 goal programming 기법을 이용한 연구가 진행되었는데, Can과 Houck(1984)은 미국 켄터키 주의 Green River Basin을 시범유역으로 preemptive linear goal programming 기법을 적용하여 실시간, 일별 저수지 운영을 Green River Basin Operations Optimization Model(GRBOOM)과 비교하였다. 또한 최적의 저수지 운영을 구성하기 위해 다섯 종류의 goal programming을 사용하여 비교한 연구(Loganathan 등, 1990)가 있다. Colorado강 유역을 대상으로 24개월 동안 goal programming을 이용하여 시간의 변화에 따른 요구량과 홍수기 운영률을 개발하여 실제 운영과 비교한 연구(Gilmore 등, 2000)와 다목적 최적화기법으로 goal programming을 사용하여 경제적, 물리적 요구량을 만족시키는 자동 저수지 시스템의 운영방법에 대한 연구(Eschenbach 등, 2000)도 있다.

본 연구에서는 홍수기말 이수용량 확보를 고려한 홍수기

다목적댐 운영에서 goal programming의 적용성을 검토하기 위해 실제 홍수사상을 이용하여, 단일저수지 운영과 저수지 연계운영을 실시하고 HEC-5 모의운영과 비교, 분석하였다.

2. 기본 이론

2.1 다목적 최적화기법

다목적 최적화기법은 두 개 이상의 목적을 가진 문제의 최적 대안을 찾고자 할 때, 고려해야 할 여러 조건들이 서로 상충되어 의사결정이 어려울 경우 비지배해의 집합이라는 개념을 도입하여 최적 대안을 찾는 기법이다. 어떤 문제의 해가 정해진 기준 및 조건들에 의해 상호 지배되지 않고 상충될 때 각각의 해들을 비지배해라고 한다. 예를 들어, 다목적댐의 운영에서 용수공급, 전력생산 및 공급, 홍수조절, 저수지 수위 유지, 하천수위 유지 등의 목적을 만족시켜야 할 경우 이러한 목적들 중 일부는 상호 지배되지 않고 상충된다. 이때 구할 수 있는 각각의 해들은 비지배해이며, Pareto 최적해 또는 efficient 해라고도 불리고, 이들의 집합은 서로 단순 비교할 수 없기 때문에 우열을 결정할 수 없다는 것이 다목적 최적화 문제의 특징이다.

단일목적 최적화문제는 목적함수 $z(x)$ 와 제약조건 $g(x)$ 로 구성되지만, 다목적최적화 문제는 p -차원 목적함수 벡터로 구성된다. 따라서 다목적 최적화 문제에서는 단일 최적해 대신에 비지배해의 집합을 찾아야 한다.

$$\max z(x) = [z_1(x), z_2(x), \dots, z_p(x)] \quad (1)$$

$$g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$x_j \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

여기서 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$ 이며, 가능해영역 X 는 $X = \{x: x \in R^n, g_i(x) \leq 0, x_j \geq 0 \text{ 모든 } i \text{ 와 } j \text{ 에 대해}\}$ 이다.

다목적 최적화문제의 해를 구하기 위해서는 먼저 가능해영역 X 내에서 비지배해의 집합을 찾아야 한다.

$$\max\text{-dominate } z(x) = [z_1(x), z_2(x), \dots, z_p(x)] \quad (4)$$

$$\text{s.t. } x \in X \quad (5)$$

여기서 max-dominate는 비지배해 중 최대값을 갖는 비지배해를 나타낸다. 가능해 x 가 주어질 때, 비지배해들의 집합을 S 로 나타내면 S 는 다음과 같이 정의된다.

비지배해들의 집합 S 에서 가능해에 포함되는 x 와 다른 x' 가 존재할 때, 어느 한 비지배해로부터 다른 비지배해로 이동하면서 하나의 목적함수 값이 증가된다면, 다른 목적함수 값은 감소한다. 즉, 가능해영역 내의 어떤 목적함수들에 대해서도 동시에 향상될 수 없는 해의 집합이 비지배해의 집합이다.

목적함수들의 p -차원 벡터 $z(x)$ 와 가능해, 그리고 비지배해의 집합 S 가 주어지면 다음과 같이 비지배목적값들의 집합을 Z 로 나타낼 수 있다.

$$Z = \{z(x) : z(x) \in R^p, \text{ and } x \in S\} \quad (6)$$

따라서, 모든 $x \in S$ 에 대해 비지배목적값의 집합 Z 에 상응하는 요소들 $[z_1(x), z_2(x), \dots, z_p(x)]$ 가 존재한다.

비지배해의 집합을 찾는 기법은 다양한데, 예를 들어 compromise programming(Zeleny, 1973, 1974)의 경우, 비지배해를 판정하는 방법으로 해들이 이상해(ideal solution)에 얼마나 근접한가를 판정하는 방법을 사용한다. 의사결정자의 선호도에 따라 목적함수의 최적값이나, 비지배해 집합의 크기를 변화시킬 수 있다. ELECTRE I(Benayoun 등, 1966)의 경우는 제한된 수의 대안을 갖는 문제에 적합하며, 지배관계에서 어느 정도의 의견 차이가 수용되는 비지배대안들의 부분적인 순위를 결정한다. ELECTRE (Roy, 1974)는 의사결정자의 선호도에 근거한 비지배해 집합의 완전한 순위를 결정할 수 있다. 합리적인 목표값에 대해 모든 목표값을 달성할 수 있다면, 더 큰 목표값에 대해서 다목적 최적화 문제를 다시 풀 수 있다.

2.2 goal programming

goal programming은 다목적 최적화 문제의 해를 구하기 위한 하나의 기법으로 주로 목표값으로부터의 편차의 합을 최소화하고, 대개 선형계획법의 형태를 갖지만 비선형계획법의 형태를 가질 수도 있다. 결정변수로는 연속이나 이산 형태의 변수가 모두 가능하며, 의사결정자의 주관적 의도를 반영하여 각 목적함수에 대해 목표를 설정할 수 있다. 선형계획법과 비선형계획법을 이용할 경우 절대로 위반될 수 없는 제약조건 때문에 불능해가 발생할 수 있다. 그러나 goal programming은 일부 경우에 완화된 제약조건이 보다 목표와 목적을 더 잘 나타낼 수 있다는 점을 이용하여 프로그램을 탄력적으로 운영하여 해를 구할 수 있다.

2.2.1 goal programming 구성

goal programming은 일부 제약조건의 우변항에 사용되는 조건을 고정된 한계라기보다는 목표로 취급하며, 각 목표에 대한 제약조건들은 다음과 같은 편차 변수를 가진다.

$$\min \sum_{i=1}^p |F_i(x) - T_i| \quad (7)$$

$$s.t. x \in X \quad (8)$$

여기서, T_i 는 의사결정자가 i 번째 목적함수 $F_i(x)$ 에 대해 설정한 목표, X 는 가능해영역이다. 선형계획법을 적용하기 위해 새로운 편차변수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$d_i^+ = \frac{1}{2} \{ |F_i(x) - T_i| + |F_i(x) - T_i| \} \quad (9)$$

$$d_i^- = \frac{1}{2} \{ |F_i(x) - T_i| - |F_i(x) - T_i| \} \quad (10)$$

여기서 d_i^+ 는 목적함수의 i 번째 목표에 대한 양의 편차이고, d_i^- 는 목적함수의 i 번째 목표에 대한 음의 편차로 부가변수로 고려할 수 있다. 동시에 양의 편차와 음의 편차가 발생할 수 없으므로, 하나 또는 두 개의 부가변수 모두 0 값을 가져야

하며, d_i^+ 와 d_i^- 는 음수가 되면 안 된다.

$$d_i^+ \cdot d_i^- = 0 \quad (11)$$

$$d_i^+, d_i^- \geq 0 \quad (12)$$

이를 종합하면 식(7)과 식(8)에 상응하는 선형계획식은 다음과 같다.

$$\min W_0 = \sum_{i=1}^p (d_i^+ + d_i^-) \quad (13)$$

$$s.t. x \in X \quad (14)$$

$$F_i(x) - d_i^+ + d_i^- = T_i \quad (15)$$

$$d_i^+, d_i^- \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (16)$$

여기서 W_0 는 목적함수를 나타낸다.

2.2.2 가중치 적용

의사결정자는 goal programming에서 각 목표 제약조건의 편차에 대한 선호도를 나타내기 위해 각 목표 T_i 에 대한 양의 편차와 음의 편차에 상대 가중치 w_i^+ 와 w_i^- 를 부과할 수 있다. 이때 편차에 따라 과대평가 또는 과소평가를 선호할 경우로 구분할 수 있으며, 최소화 문제의 경우는 w_i^+ 가 w_i^- 보다 크도록 정하면 목표에 대한 과소평가를 선호하여 음의 편차를 더 선호하게 된다. 의사결정자는 목적의 선호도에 따라 순서를 정할 수 있는데, 우선권 $P_i (i = 1, 2, \dots, p)$ 을 이용하여 목적에 따른 부가변수의 편차에 가중치를 부과하게 된다. 최종적으로 식 (13)-식 (16)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\min \sum_{i=1}^p P_i (w_i^+ d_i^+ + w_i^- d_i^-) \quad (17)$$

$$s.t. x \in X \quad (18)$$

$$F_i(x) - d_i^+ + d_i^- = T_i \quad (19)$$

$$d_i^+, d_i^- \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (20)$$

goal programming은 성취해야 할 목표값이 의사결정자의 주관에 의존하기 때문에 항상 비지배해를 보장하는 것은 아니라는 단점을 가지고 있다.

3. 시범유역 적용

3.1 저수지 단독 운영

단일 저수지 운영에 goal programming의 적용성을 검토하기 위해 충주댐 유역을 선정하였다. 충주댐은 국내에서 소양강댐에 이어 두 번째로 큰 27억 5,000만 m^3 의 저수능력을 갖추어 연 33억 8,000만 m^3 의 각종 용수를 수도권 지역에 공급하고, 6억 1,600만 m^3 의 홍수조절능력을 보유하고 있는 다목적댐이다. 약 6,650 km^2 의 유역면적을 가지며, 길이

464 m, 높이 97.5 m, 여수로 계획홍수량 18,000 m³/s이고 계획방류량은 16,200 m³/s이다. 충주댐의 제원은 다음 Table 1과 같다.

본 연구에서는 충주댐의 홍수조절을 위한 주요 지점으로 여주를 선정하고 여주교 지점의 계획홍수량 15,600 m³/s을 기준으로 검토하였다. 충주댐의 방류량과 남한강의 지류인 달천과 섬강, 청미천의 유량을 홍수추적하여 여주 지점의 홍수량으로 이용하였다. 남한강 유역의 경우 2006년 7월의 강우로 인해 여주 지점에서 계획홍수량에 근접하는 유량이 발생하였기 때문에 본 연구에서는 2006년 7월 14일부터 19일(5일)까지의 수문자료를 사용하여 1시간 간격으로 120시간 동안 분석하였다. 분석기간의 충주댐의 실측 최대유입량과 최대방류량은 Table 2에 제시하였다.

3.2 저수지 연계 운영

goal programming을 저수지 연계운영에 적용하기 위해 나

독강 상류의 안동댐과 임하댐을 선정하였다. 안동댐은 낙동강 본류에 위치한 다목적댐으로 높이 83 m, 길이 612 m이며 총저수량 약 1,248×10⁶ m³이고 유역면적은 1,584 km²이다. 낙동강 수계에 처음 건설된 안동댐은 하류 지역의 홍수 피해를 저감시키고 농·공업용수 및 생활용수를 확보하기 위하여 1971년 4월에 착공, 1976년 10월에 준공되었다. 임하댐은 낙동강의 지류인 반변천에 위치하고 있으며 안동시로부터 17.4 km 상류에 건설되었고 안동댐의 약 50%에 해당하는 총저수량을 가지고 있다. 임하댐은 높이가 73 m이고 길이는 515 m, 총저수량은 595×10⁶ m³, 유역면적은 1,361 km²이다. 4대강 유역 종합개발계획의 하나인 다목적 수자원개발사업에 의해 건설된 다목적댐으로, 1984년 12월 착공하여 1993년 12월 31일 준공되었다.

저수지 연계운영을 위한 최적 모형을 구성하기 위해 하류 주요 지점으로 안동시 지점을 선정하고 안동댐의 반변천 합류점의 계획홍수량 2,710 m³/s과 임하댐의 반변천 합류점 계

Table 1. Chungju dam specification

Item	unit	Value	Item	unit	Value
Drainage Area	km ²	6,648	Storage Area (Flood Control Level)	km ²	97.0
Height	m	97.5	Annual Mean Rainfall	mm	1,197.6
Length	m	447.0	Annual Water Demand	10 ⁶ m ³	3,380
Normal Altitude	EL.m	147.5	Total Storage	10 ⁶ m ³	2,750
Design Flood Water Level	EL.m	145.0	Conservation Storage	10 ⁶ m ³	1,789
Normal High Water Level	EL.m	141.0	Flood Control Storage	10 ⁶ m ³	616
Flood Control Level	EL.m	138.0	Design Flood	m ³ /s	18,000
Low Water Level	EL.m	110.0	Design Outflow	m ³ /s	16,200

Table 2. Peak inflow and release from chungju dam for the flood event of 2006

Period	Peak Inflow(m ³ /s)		Peak Release(m ³ /s)	
	Time	Inflow	Time	Release
2006.7.14 ~ 7.19.	2006.7.16.17:00	22,650.0	2006.7.16.24:00	9,052.8

Table 3. Andong dam-imha dam specification

Andong Dam			Imha dam		
Item	unit	Value	Item	unit	Value
Drainage Area	km ²	1,584	Drainage Area	km ²	1,361
Height	m	83.0	Height	m	73.0
Length	m	612.0	Length	m	515.0
Normal Altitude	EL.m	166.0	Normal Altitude	EL.m	168.0
Design Flood Water Level	EL.m	165.0	Design Flood Water Level	EL.m	164.7
Normal High Water Level	EL.m	161.7	Normal High Water Level	EL.m	163.0
Flood Control Water Level	EL.m	-	Flood Control Water Level	EL.m	161.7
Low Water Level	EL.m	121.0	Low Water Level	EL.m	124.0
Annual Mean Rainfall	mm	950.0	Annual Mean Rainfall	mm	1,055.1
Annual Water Demand	10 ⁶ m ³	926	Annual Water Demand	10 ⁶ m ³	591.6
Total Storage	10 ⁶ m ³	1,248	Total Storage	10 ⁶ m ³	595
Conservation Storage	10 ⁶ m ³	1,000	Conservation Storage	10 ⁶ m ³	424
Flood Control Storage	10 ⁶ m ³	110	Flood Control Storage	10 ⁶ m ³	110
Design Flood	m ³ /s	6,480	Design Flood	m ³ /s	4,600
Design Outflow	m ³ /s	4,500	Design Outflow	m ³ /s	2,500

Table 4. Peak inflow and release from andong and imha dams

Period	Dam	Peak Inflow(/s)		Peak Release(/s)	
		Time	Inflow	Time	Release
2002.8.27 ~ 2002.9.6	Andong Dam	2002.9.1.3:00	3,677.6	2002.9.1.2:00	590.3
	Imha Dam	2002.8.31.22:00	7,112.8	2002.9.1.2:00	2,175.9

획홍수량 3,020 m³/s를 고려하여 안동시의 계획홍수량 5,730 m³/s를 기준으로 검토하였다. 안동시 지점의 홍수량 산정을 위해 안동댐과 임하댐의 방류량과 반변천의 지류인 길안천의 유량을 홍수추적하여 이용하였다. 안동댐과 임하댐에서 주요 지점인 안동시까지의 거리가 가깝기 때문에 1시간 간격으로 모의할 경우 도달시간이 홍수추적모의시간보다 짧아지므로 2002년의 강우사상을 10분 간격으로 4,000분(67시간) 동안 모의운영하였다.

4. 모형 적용

본 연구에서는 홍수기 저수지 최적운영을 실시함에 있어 GAMS(Rosenthal, 2008)를 이용하여 goal programming 모형을 적용하였다. 모형의 주요 목표로는 홍수기 말의 수위를 홍수기제한수위로 유지하는 것과 주요 지점의 홍수량을 매 시간 계획홍수량 아래로 적절히 유지하는 것으로 설정하였다. 구성된 목적함수와 제약조건은 다음과 같다.

$$\min \sum_{i=1}^n Z = (d_{sn}^+ + d_{sp}^+ + d_{Qi}^+) \quad (21)$$

$$s.t. S_{i+1} = S_i + I_i - Q_i \quad (22)$$

$$S_n + d_{sn}^- - d_{sn}^+ = S_R \quad (23)$$

$$D_i + d_{Qi}^- - d_{Qi}^+ = D_{\max} \quad (24)$$

$$Q_i' = C_0 Q_{i+1} + C_1 Q_i + C_2 Q_{i-1}' \quad (25)$$

$$D_i = Q_i' + I_i' \quad (26)$$

$$S_{\min} \leq S_{i+1} \leq S_{\max} \quad (27)$$

$$Q_{\min} \leq Q_{i+1} \leq Q_{\max} \quad (28)$$

$$Q_{i+1} \leq \alpha \cdot Q_p \quad (29)$$

$$D_i \leq D_{\max} \quad (30)$$

$$S_b, Q_b, Q_i', D_b, d_{sn}^+, d_{sn}^-, d_{Qi}^+, d_{Qi}^- \geq 0 \quad (31)$$

여기서, S_i 는 기간 i 말의 댐의 저류량, I_i 는 기간 i 동안 댐의 유입량, Q_i 는 기간 i 동안 댐의 방류량, D_i 는 기간 i 말의 하도추적된 주요 지점 유량, d_{sn}^+ 는 홍수기 말 댐의 저류량에 대한 양의 편차, d_{sn}^- 는 홍수기 말 댐의 저류량에 대한 음의 편차, S_R 는 댐의 홍수기제한수위(안동댐은 상시만수위)에 해당하는 저류량, d_{Qi}^+ 는 i 시간에서 주요 지점 유량에 대한 양의 편차, d_{Qi}^- 는 i 시간에서 주요 지점 유량에 대한 음의 편차, Q_i' 는 댐 방류량을 하도추적 한 유량, I_i' 는 기간 i 동안 지류유입량, $S_{\min}$ 는 댐의 저수위에 해당하는 저류량,

$S_{\max}$ 는 댐의 최대수위에 해당하는 저류량, $Q_{\min}$ 는 댐의 최소 방류량, $Q_{\max}$ 는 댐의 최대방류량, Q_p 는 댐의 계획방류량, $D_{\max}$ 는 주요 지점의 계획홍수량, C_0, C_1, C_2 는 Muskingum 방법에 의한 계수이다. Muskingum 방법에 의한 지체시간 K , 저류상수 x 는 충주댐의 경우 한강유역종합치수계획수립보고서(국토해양부, 2009), 안동댐, 임하댐의 경우 기존댐치수능력증대사업보고서(건설교통부, 2004)에서 제시된 값을 사용하였다. 또한 모형의 주요 목표에는 동일한 가중치를 적용하였다.

goal programming의 변수는 댐의 방류량과 하도추적된 주요 지점의 유량이며, 제약조건으로는 저류함수식, 저류량 및 유입량의 범위, 비음수조건이 포함되어 있다. 또한 목표로 설정한 홍수기말 제한수위(홍수기말 제한수위가 없는 경우 상시만수위)로 유지하기 위한 양과 음의 편차에 관한 식과 주요 지점에서 매 시간 계획홍수량 아래로 유지하기 위한 식이 반영되어 있다. 각 유역의 지류유입량과 하도추적에 관한 식도 제약조건에 반영하였다.

4.1 저수지 단독 운영

저수지 단독운영을 위한 초기조건은 충주댐의 홍수기제한수위와 모의기간 시점에 관측된 실제수위로 설정하였고, goal programming의 결과를 동일한 조건 하에서 운영된 HEC-5 결과 및 실제 충주댐 운영 결과와 비교, 검토하였다. 홍수기 HEC-5의 모의운영은 하류의 주요 지점의 계획홍수량을 초과하지 않으며 저수지의 최대방류량을 초과하지 않는 범위에서 저수지를 운영한다. 어느 시점에서 이용할 수 있는 홍수조절 용량을 최대한 활용하고 홍수사상이 끝나는 시점에서 상시만수위를 유지하도록 홍수기 저수지운영을 수행한다. 두 개 이상의 저수지에 대한 연계운영으로는 하류의 주요지점의 계획홍수량을 초과하지 않고 각 댐의 유효용량의 비율을 동일하게 하도록 운영한다.

goal programming 적용의 경우, 전체 유입량 자료를 입력하여 운영하고 있다. 따라서 유사한 조건에서 goal programming을 HEC-5 모의운영과 비교, 검토하기 위하여, HEC-5 모형의 예보시간을 변경하면서 실제 충주댐 운영결과와 비교하였다. 또한 예보시간에 따른 결과와 실제 운영을 비교하기 위해, 모의시점에서 충주댐의 실제 운영의 초기수위인 EL. 132 m를 적용하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 4시간 예보시간과 24시간 예보시간에 따른 충주댐과 여주 지점에서의 HEC-5 운영결과이다. 4시간 예보시간을 사용할 경우 충주댐의 최대방류량은 24시간 예보시간의 결과보다 약 2,796 m³/s 작고, 여주 지점의 홍수량은 2,490.4 m³/s 작은 결과를 얻었다. 4시간 예보시간의 결과는 실제 충주댐의 운영과 유사한 형태이지만, 전 유입량을 알고 있는 goal programming을 이용한

Fig. 1. Chungju dam forecasting outflow

Fig. 2. Forecasting outflow at Yeouju

최적 운영실적과 비교하기 위해 최대예보시간인 24시간으로 운영한 HEC-5 결과로 결정하였다.

4.1.1 초기수위조건 : 홍수기제한수위

goal programming 운영과 HEC-5 운영을 동일한 조건에서 비교하기 위해 초기수위 조건을 충주댐의 홍수기제한수위인 EL. 138 m로 동일하게 적용하였으며, goal programming의 충주댐 방류량의 변화율도 HEC-5 모의운영의 방류량 변화율과 일치시켰다. goal programming과 HEC-5 운영결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 제시하였다.

goal programming의 경우 사전방류를 통해 수위를 EL. 137 m($207.13 \times 106 \text{ m}^3$)로 낮추어 저류공간을 미리 확보하였고 10,000 m^3/s 이하의 유입량일 때 50시간 넘게 저류한 후에 최대방류능력까지 방류하여 모의 종점에는 홍수기제한수위로 운영되었다. 24시간 예경보를 반영한 HEC-5의 경우에는 첨두유입량이 발생한 시점에서 8시간 후 최대방류량으로 방류하였으며 이때 저류량은 계획홍수위보다 0.2 m($613.77 \times 106 \text{ m}^3$) 초과하였다. HEC-5 모의운영에서는 모의 시점으로부터 42시간 이후 계획방류량을 초과하여 최고 17,533 m^3/s 를 방류하였으며, 댐의 최고수위를 초과하지 않았지만 계획홍수위를 초과하는 결과로 goal programming의 운영보다 안전성이 부족한 운영을 한 것으로 판단된다.

주요 지점으로 설정한 여주 지점의 계획홍수량은 15,600 m^3/s 이며, HEC-5 모의운영의 결과는 모의운영이 시작된 44시간 후 18시간 동안 계획홍수량을 초과(84,403.61 m^3/s)하였다.(Fig.

Fig. 3. Chungju dam outflow

Fig. 4. Chungju dam storage

Fig. 5. Flood at Yeouju

5) 이에 반해 goal programming 운영 결과는 약 20시간 동안 계획홍수량에 달하는 홍수량이 발생하였으나 계획홍수량을 초과하지 않은 범위 안에서 운영되었다. goal programming을 이용한 최적 운영은 충주댐의 계획방류량 내에서 방류하여 댐의 안정성과 여주 지점의 계획홍수량 이하 운영 등 두 가지 목표를 모두 만족시킬 수 있었다. 반면에 HEC-5 모의 운영은 계획방류량을 초과하여 방류하였고 이를 통한 방류시점에 대한 최적화가 이루어지지 않아 충주댐의 월류에 대한 위험뿐만 아니라 주요 지점의 계획홍수량에 근접하는 운영결과를 보인 것으로 판단된다.

4.1.2 초기수위조건 : 실제운영 수위

본 절에서는 저수지 운영 초기 수위조건으로 2006년 7월 실제 호우사상 발생 시의 충주댐 수위인 EL. 132 m를 사용

Fig. 6. Chungju dam outflow

Fig. 7. Chungju dam storage

Fig. 8. Flood at Yeosu

하여 goal programming 운영 결과와 실제운영 결과를 비교, 검토하였다. 실제 충주댐 운영의 경우 일정기간 동안 사전방류를 수행하여 20시간 후에는 저류량이 감소하였다. 사전방류를 통해 저류공간을 확보하여 계획홍수위보다 낮은 상태로 운영하였으며, 최대방류량은 $9,052.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 동일한 시점에서 goal programming의 방류량에 비해 약 $2,200 \text{ m}^3/\text{s}$ 감소하였다.

여주 지점에서 실제 홍수기에 충주댐을 운영한 결과는 충주댐의 사전방류로 인해 goal programming 운영 결과보다 모의 시점부터 홍수량이 증가하기 시작했으며 최대홍수량은 약 $3,400 \text{ m}^3/\text{s}$ 작게 운영하였다.(Fig. 8) goal programming의 운영도 계획홍수량 이하로 운영되었으며, 운영 목적 중의 하나인 홍수기제한수위에 맞추어 계획방류량을 방류하여 여주 지점에서 계획홍수량에 달하는 홍수량이 발생했다. 이는 효율성을 증시하여 운영하는 goal programming의 특성에 따른 결과로 판단된다.

초기수위 EL. 132 m로 운영된 goal programming의 운영 결과가 초기수위 EL. 138 m로 운영된 goal programming의 운영 결과보다 짧은 시간 동안 여주 지점의 계획홍수량에 해당하는 값으로 운영되어 실제 운영과 유사한 결과를 나타냈는데(Fig. 5, Fig. 8) 이는 실제 운영과 유사한 초기수위로 운영을 시작했기 때문이다.

4.2 저수지 연계 운영

저수지 최적 연계운영을 위한 주요 지점으로 안동시 지점을 선정하였다. 실제 안동시 지점을 기준으로 안동댐은 5.8 km, 임하댐은 17.4 km 상류에 위치하고 있으나 지형적인 영향으로 임하댐으로부터 안동시까지의 홍수도달시간은 안동댐으로부터 안동시까지의 도달시간에 비해 약 4배에 달하여 최적 모형에서는 하도추적을 위한 하도의 구간을 안동시-안동댐 구간은 하나의 구간으로, 안동시-임하댐 구간은 네 개의 구간으로 분할하였다.

최적 모형은 홍수기 말에 각 댐을 홍수기제한수위(안동댐의 경우 상시만수위)로 유지하는 것과 안동시 지점의 홍수량의 최대값을 최소화하는 것을 목적함수로 설정하여 운영하였다. 안동시 지점의 홍수량은 안동댐과 임하댐으로부터 방류되는 유량을 하도추적하고 길안천의 지류유입량을 고려하여 산정하였다. 각 댐의 저류량은 저수위에서부터 계획홍수위에 해당하는 저류량의 범위 내에서 변동하는 것으로 제한하였고, 방류량의 최대값에서 치수능력 증대사업을 통해 현재 설치중인 각 댐의 비상여수로 용량은 고려하지 않았다.

목적함수와 제약조건을 goal programming 형태로 구축하였고, 안동댐과 임하댐의 홍수기제한수위에 해당하는 저수량과 계획방류량, 안동시 지점의 계획홍수량과 비우수조건을 제약조건으로 사용하였다. 안동댐과 임하댐 저수량의 양과 음의 편차, 안동시 계획홍수량의 양의 편차를 최소화하는 목적함수를 사용하여 하나의 최적해를 구하였다.

4.2.1 초기조건 안동댐의 상시만수위, 임하댐의 홍수기제한수위

안동댐과 임하댐의 연계운영에 대해 10분 간격으로 400 기간 동안 goal programming을 이용한 최적 운영과 HEC-5 모의운영 결과를 비교하였다. 단일운영과 달리 10분 간격의 자료 사용으로 HEC-5 모의운영 예보시간을 조정하여 최대 예보시간을 찾아, goal programming의 적절성을 판단하였다.

1) 안동댐

안동댐의 goal programming 운영은 사전방류량으로 저류공간을 확보한 뒤, 최대유입량이 유입된 시점 450분 후에 방류량을 증가시켜 방류량을 $1,200 \text{ m}^3/\text{s}$ 이하로 유지하면서 계획방류량을 방류하였다. HEC-5 모의운영의 경우 유입량이 증가하는 시점부터 방류하기 시작하여 최대유입량이 발생할 때 방류량을 증가하여 종료되는 시점까지 일정한 방류량을 유지하며 방류하였다. HEC-5 운영과 goal programming 운영 모두 계획홍수위를 초과하지 않는 범위 내에서 운영되었고, goal programming의 경우 방류할 때 상시만수위 아래로 방

Fig. 9. Andong dam outflow

Fig. 10. Andong dam storage

류한 뒤 잔류유입량으로 인해 상시만수위를 유지하는 결과가 나타났다.(Fig. 9, Fig. 10)

goal programming 운영보다 HEC-5 운영이 일정하게 방류하여 방류량 증가에 따른 하도영향을 완화시켜 줄 수 있다. 하지만 유입량이 증가하는 시점에 임하댐도 방류가 진행되므로 안동시 지점의 홍수량을 고려하면 안동댐의 홍수조절 공간을 충분히 이용하지 못한 것으로 판단된다.

2) 임하댐

임하댐의 경우 안동댐의 침투유입량에 비해 약 2배에 해당하는 7,112 m³/s를 침투로하는 유량이 유입되었다. 이는 임하댐의 홍수조절용량을 초과하는 유량으로, 초기수위를 홍수기 제한수위(EL. 161.7 m)에서 시작하였기 때문에 HEC-5 운영에서는 계획홍수위(EL. 164.7 m)를 0.06 m (121.42×106) 초과하였다. goal programming의 운영에서는 사전방류를 통해 계획방류량까지 증가시켜 방류하였고 유입량이 증가하면서 계획홍수위를 유지하였다. 유입량 감소에 따라 방류량이 급격하게 감소하였는데, 이는 안동댐의 방류에 의한 안동시 지점의 계획홍수량 초과를 고려하여 운영된 것으로 판단된다.(Fig. 11, Fig. 12)

3) 안동시

HEC-5 운영의 경우 임하댐의 계획방류량을 초과하는 방류가 400분 동안 지속되어 안동시 지점의 계획홍수량을 최대 306.8 m³/s를 초과하였다. goal programming의 경우 안동시의 계획홍수량을 초과하지 않도록 임하댐과 안동댐의 방류량

Fig. 11. Imha dam outflow

Fig. 12. Imha dam storage

Fig. 13. Flood at andong

을 조절하여 안동시의 계획홍수량을 초과하지 않았다. 3,000 분 이후에는 홍수량이 감소하였는데, 임하댐이 계획홍수위를 유지하고 안동댐의 방류량이 감소하는 시점과 일치하며 안동댐의 상시만수위로 수위를 유지한 뒤에 임하댐이 홍수기제한 수위까지 방류하는 운영임을 알 수 있다. 댐의 연계운영에서 goal programming은 방류량시점과 각 댐의 홍수조절 용량을 최적으로 이용하여 HEC-5의 저수지 모의운영보다 주요지점의 계획홍수량을 이용하는데 장점을 가지고 있다.(Fig. 13)

4.2.2 HEC-5, goal programming, 실제운영 비교

1) 안동댐

2002년 8월 홍수의 경우 실제 안동댐의 초기수위는 EL. 175.7m로서 상시만수위에 해당하는 저류량보다 116.15×106 m³의 추가 저류공간이 확보된 상태에서, 계획방류량의 1/9 정도

Fig. 14. Andong dam outflow

Fig. 15. Andong dam storage

Fig. 16. Imha dam outflow

Fig. 17. Imha dam storage

수준으로 지속적인 방류를 함으로서 안동댐을 안전하게 운영하였다. HEC-5 모의운영과 goal programming도 실제운영과 마찬가지로 계획홍수위 이하에서 안전하게 운영되었으며, 운영 종료 시점에는 실제운영과 유사하게 상시만수위를 유지하는 결과를 얻을 수 있었다. HEC-5 운영은 최대유입량이 발생한 시점에서 550분이 지난 시점에서 방류를 시작하여 최대 1,026 m³/s로 방류하였다. goal programming의 경우, 안동댐의 상시만수위 아래의 저류공간을 이용하여 하류지점의 계획홍수위 조절에 이용하였다고 판단된다.(Fig. 14, Fig. 15)

2) 임하댐

2002년 8월 홍수의 경우 실제 임하댐의 운영은 초기수위를 EL. 159.2 m로 낮추어 홍수기제한수위 이하의 저류공간을 추가로 확보한 상태에서 운영하였으며, HEC-5와 goal programming 운영에 비해 사전 방류를 통해 충분한 저류공간을 확보하였다. goal programming의 경우, 모의운영의 종료시점에 홍수기제한수위에 도달하기 위한 목적을 달성하기 위해 계획방류량에 해당하는 방류를 하였다. 최적 운영은 주요지점의 계획홍수량을 충분히 이용하기 때문에 임하댐의 큰 방류량에도 안동시 지점은 안전한 결과를 얻을 수 있었다.(Fig. 16, Fig. 17)

5. 결 론

본 연구에서는 홍수기에 저수지의 최적 운영을 위해 다목적 최적화기법의 한 형태인 goal programming을 이용하였다.

실제 상황에서 goal programming의 적용성을 검토하기 위해 실제 홍수사상을 이용하였고, 저수지 모의운영 프로그램으로 널리 사용되는 HEC-5의 결과와 비교, 검토하였다. 저수지 단독운영의 경우 2006년 7월의 강우사상을 이용하여 충주댐에 대해 운영하였으며, 저수지 연계운영으로 2002년 8월말 강우사상을 이용하여 안동댐과 임하댐에 대해 운영하였다.

홍수기의 goal programming을 이용한 저수지 운영의 해를 구하기 위해 목적함수와 제약조건을 선형계획법의 형태로 구축하였다. goal programming의 변수는 방류량, 하도추적된 주요 지점의 유량, 강우사상이 종료된 후의 저류량과 주요 지점 유량에 대한 양과 음의 편차 등이다. 댐의 홍수기제한수위(홍수기제한수위가 없을 경우 상시만수위)에 해당하는 저류량과 계획방류량, 주요 지점의 계획홍수량과 비음수조건이 제약조건으로 사용되었다. 저류량의 양과 음의 편차, 주요 지점 계획홍수량의 양의 편차를 최소화하는 목적함수를 사용하여 단일 최적해를 구하였다.

충주댐의 초기 운영값을 홍수기제한수위로 지정하였을 때, HEC-5 모의운영은 충주댐의 계획방류량과 여주 지점의 계획홍수량을 초과했지만 goal programming 운영 결과는 충주댐의 저류공간과 계획방류량을 충분히 활용하여 여주 지점의 계획홍수량을 초과하지 않았다. 실제 운영수위를 사용하여 실제 운영과 비교한 결과는 goal programming 운영은 모의 종료 시점에서 홍수기제한수위로 조정하기 위한 방류를 제외하면 실제운영과 유사한 형태를 가지고 있다. 저수지 단독운영의 최적 운영 결과 실제 운영 결과와 최대방류량은 유사한 형태를 가지며, 저류공간이 충분하지 않을 경우나 유입량이

매우 큰 경우 최적 기법이 효율적으로 활용될 수 있다고 판단된다. 안동댐과 임하댐의 연계운영의 경우 안동댐의 상시만수위와 임하댐의 홍수기제한수위를 초기수위로 가정한 경우 모의운영과 goal programming의 결과에서 각 댐의 방류는 안동시의 계획홍수량 아래로 이루어졌으며 각 댐의 저수량과 계획방류량을 효과적으로 이용하였으나 실제 운영과는 상당한 차이를 보였다.

저수지 단독운영과 연계운영의 검토 결과는 goal programming을 이용했을 때 홍수기 말에 저수위를 홍수기제한수위로 유지하며 주요 지점의 홍수량을 매 시간 계획홍수량 이하로 유지하는 목적을 만족하는 최적 운영결과를 얻을 수 있었다. 홍수기 다목적댐의 운영은 홍수조절용량을 최대한 이용하여 하루 주요 지점의 첨두홍수량을 저감시키거나 계획홍수량을 초과하지 않도록 방류량과 방류시점을 조절함으로써 홍수피해 규모를 최소화시킬 수 있다고 판단된다. goal programming을 이용한 최적 운영의 경우 전 구간의 유입량을 알고 있는 상태에서 최적방류시점이 결정되며 방류량의 최적 분배가 가능한 점은 실제 운영과 차이가 있다. 하지만 적절한 제약조건을 적용하고 홍수예보시스템을 이용하여 어느 정도 정확한 유입량을 예측할 수 있다면, 최적의 방류시점과 방류량을 결정함으로써 주요 지점의 홍수량을 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2010-0029194).

참고문헌

건설교통부 (2004) 기존댐치수능력증대사업보고서.
국토해양부 (2009) 한강유역 종합치수계획수립 보고서.
한국수자원공사 (2007) 댐운영 실무 편람.
Benayoun, R., Roy, B. and Sussman, B. (1966) ELECTRE : Une Methode Pour Guide le Choix en Presence de Points de Vue Multiples. *Sema (Metra International), Direction, Scientifique, Note de Travail*, No.49, Paris.
Can, E.K. and Houck, M.H. (1984) Real-time reservoir operations by goal programming. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 110, No. 297, pp. 297-309.
Eschenbach, E.A., Magee, T., Zagona, E., Goranflo, M. and Shane,

R. (2001) Goal programming decision support system for multiobjective operation of reservoir systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 127, No.2. pp. 108-120.
Gilmore, A., Magee, T., Fulp, T. and Strzepek, K. (2000) Multiobjective optimization of the Colorado River. *Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management: Building Partnerships 104*.
Ignizio, J.P. (1982) *Linear programming in single and multiple objective systems*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
Labadie, W.J (2004) Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 130, No. 2, pp. 93-111.
Loganathan, G.V. and Bhattacharya, D. (1990) Goal-programming techniques for optimal reservoir operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 116, No. 6, pp. 820-838.
Murray, D.M. and Yakowitz, S.J. (1997) Constrained differential dynamic programming and its application to multireservoir control *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 5, pp. 1017-1027
Raudkivi, A.J. (1979) *Hydrology : An advanced introduction to hydrological process and modelling*, Pergamon Press, New York, N.Y
Rosenthal, R.E. (2008) GAMS- A User's Guide.
Roy, B. (1974) Criteres Multiples et Modelisation des Preference- L'Apport des Relations de Surclassement, *Revue d'Econome Politique*, No. 1.
Wurbs, R.A. (1993) Reservoir system simulation and optimization models *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119, No. 4, pp. 455-472.
Xu, K., Zhou, J., Gu, R. and Qin, H. (2011) Approach for aggregating interval-valued intuitionistic fuzzy information and its application to reservoir operation. *Expert System with Application*, Vol. 38, No. 7, pp. 9032-9035.
Yeh, W.G (1985) Reservoir management and operations model ; A state-of-the-at-review. *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 12, pp. 1797-1818.
Zeleny, M. (1973) Compromise programming in J.L. Cochrane and M. Zeleny (eds.) *Multiple criteria decision making*, Univ. of South Carolina Press, Columbia.
Zeleny, M. (1974) A concept of compromise solutions and method of displaced ideal, *Computers and Operations Research*, Vol. 1, No. 4, pp. 479-496.

© 논문접수일 : 11년 02월 21일
© 심사의뢰일 : 11년 03월 02일
© 심사완료일 : 11년 03월 23일