이상홍수를 고려한 퍼지 최적 저수지 운영

Fuzzy Optimal Reservoir Operation Considering Abnormal Flood

최창원* · 유명수** · 이재응***

Choi, Changwon · Yu, Myung Su · Yi, Jaeeung

Abstract

In this study, the model enhancing the safety of reservoirs and reducing the downstream flood damage by reservoirs system operation during abnormal flood was developed. Linear programming was used for the optimal reservoirs system operation during an abnormal flood and fuzzy inference system was introduced to solve the uncertainty problem which is included in hydrological factors like inflow, water level and inflow variation of reservoir operation. The linear programming model determined the optimal reservoir system operation rules and could be used in situation where water demands varies rapidly during the abnormal flood events using fuzzy control technique. In this study, the optimal reservoirs system operation for Andong and Imha reservoirs located in the upper basin of Nakdong river was performed in order that the design flood discharge at Andong city would not be exceeded for the design flood of 100 year and PMF(Probable Maximum Flood). And the model that determines the release according to the downstream flow discharge, the reservoir storage, the inflow and the inflow variation of each reservoir was developed using the optimal system operation result and fuzzy control technique. The developed model consisted of 224 fuzzy rules according to the conditions of Andong reservoir, Imha reservoir and Andong city. And the release from each reservoir could be determined when the current data are used as input data through the developed GUI.

Keywords : fuzzy control technique, optimal reservoir operation, reservoir system operation, abnormal flood

요 지

본 연구에서는 이상홍수 발생 시 저수지의 안전성을 확보함과 동시에 두 개의 저수지를 효율적으로 연계운영하여 하류의 홍수피해를 줄이기 위한 모형을 개발하였다. 이상홍수 발생 시 저수지 최적연계운영을 위해 선형계획법을 사용하였고, 저수지 운영에서 유입량, 저수지 수위, 유입량의 증감 등의 요소에 포함된 불확실성을 해결하기 위해 퍼지제어기법을 도입하였다. 선형계획법을 이용하여 이상홍수 유입에 따른 저수지 최적연계운영규칙을 찾아내고, 퍼지제어기법을 사용하여 신속하고 정교한 운영이 요구되는 이상홍수 유입상황에 사용할 수 있는 모형을 개발하였다. 본 연구에서는 낙동강 상류에 위치한 안동댐과 임하댐을 대상으로 각 댐의 저수지에 100년 빈도의 홍수와 PMF가 유입될 때 안동시의 계획홍수량을 초과하지 않도록 저수지 최적연계운영을 실시하였고, 최적연계운영규칙과 퍼지제어기법을 사용하여 댐 하류지점의 유량과 각 댐별 저류량, 유입량, 유입량의 증감에 따라 방류량을 결정하는 모형을 개발하였다. 개발된 모형은 안동댐과 임하댐의 각 저수지 및 안동시의 유량에 따라 결정되는 224개의 퍼지규칙으로 정리되었으며, GUI를 통해 현재 유량을 입력하면 각 댐의 방류량을 간단히 결정할 수 있다.

핵심용어 : 퍼지제어기법, 저수지최적운영, 저수지 연계운영, 이상홍수

1. 서 론

최근 한반도에서는 지구온난화의 영향으로 태풍이나 국지성 집중호우 등 이상기후현상이 빈번히 발생하고 있으며 이로 인한 피해가 늘고 있다. 특히 2002년 발생한 태풍 루사는 강릉지역에 PMP(Probable Maximum Precipitation) 이상의 집중호우를 발생시켜 동막댐, 장현댐 등의 저수지가 붕괴되어 막대한 피해를 초래하였다. IPCC(Intergovernmental

Panel for Climate Change) 보고서(2007)에 따르면 한반도의 연평균강수량은 증가하고 강우발생일은 감소하여 강우강도는 지속적으로 증가하고 있는 것으로 나타났으며, 지금까지의 기후변화 추세를 통해 볼 때 앞으로의 호우 사상은 현재보다 더 극심한 양상을 나타낼 것으로 예상된다. 이상홍수란 댐 및 하천시설물 설계에 적용된 강우강도와 홍수량을 초과하는 경우를 의미한다(고덕구, 2011). 이상홍수가 저수지로 유입될 경우 일반적인 홍수가 유입될 경우의 저수지 운

*정회원 · 아주대학교 대학원 건설교통공학과 박사과정 (E-mail : itsme99@ajou.ac.kr)

**정회원 · 아주대학교 대학원 건설교통공학과 박사과정 (E-mail : niceguy-03@ajou.ac.kr)

***정회원 · 교신저자 · 아주대학교 공과대학 환경건설교통공학부 교수 (E-mail : jeyi@ajou.ac.kr)

영보다 더욱 신속하고 정교한 운영이 요구될 것으로 판단된다. 현재 우리나라 다목적댐의 경우 월별 목표수위를 기준으로 하는 저수지 운영률이 존재하지만 이것은 거시적 관점에서의 저수지 운영 목표일 뿐, 실제 이상홍수가 발생할 경우 저수지 운영에 큰 도움을 주지 못할 것으로 판단된다. 국내의 경우 댐의 수문학적 안정성 검토 및 치수능력증대 기본계획 수립보고서(2004)에서 주요 다목적댐에 대하여 이상홍수 유입 시 댐의 안전성 및 홍수조절능력에 대한 평가를 통해 우선순위에 따라 PMF(Probable Maximum Flood) 유입 시 홍수량 배제를 위한 비상여수로가 건설되고 있지만, 실제 PMF에 근접하는 홍수가 도달했을 때의 저수지 운영방안에 대해서는 거의 고려되지 않고 있다. 또한 두 개 이상의 저수지가 위치한 유역에 PMF에 근접하는 홍수가 발생했을 때, 저수지의 홍수 대응 능력을 향상시킬 수 있는 최적 저수지 연계운영은 고려되지 못하고 있다. 본 연구에서는 두 개의 다목적댐이 위치한 유역에 이상홍수 발생 시, 두 개의 저수지를 효율적으로 연계 운영하여 하류의 홍수피해를 최소화함과 동시에 저수지의 안전성을 확보하기 위해 저수지 운영모형을 개발하는 것을 목적으로 하였다. 현재 본 연구에서 개발하고자 하는 모형은 저수지 운영모형이나 최적화 모형과 같이 홍수발생 시 전체 기간 동안의 유입량을 알고 있다고 가정하는 상태에서 전 기간에 대한 방류계획을 수립하는 것이 아니라, 이상홍수와 같은 긴박한 상황에서 실시간으로 의사결정자의 의사결정을 지원하기 위한 저수지 방류량 결정모형이다.

저수지 운영에서 방류량 결정에 영향을 미치는 저수지 저류량, 유입량 등의 요소에는 불확실성과 애매모호함이 포함되어 있다. 따라서 불확실성과 애매모호함을 다루기에 적합한 것으로 알려진 퍼지이론을 사용한 저수지 운영기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 퍼지제어기법을 사용한 해외의 연구사례를 살펴보면 Jairaj와 Vedula(2000)는 다수의 저수지가 존재하는 유역에 추계학적 동적계획법(stochastic dynamic programming)을 적용하기 위해 퍼지 수치계획법(fuzzy mathematical programming)을 도입하였고, Panigrahi와 Mujumdar(2000)은 퍼지제어기법과 추계학적 동적계획법(stochastic dynamic programming)을 적용하여 농업용 저수지를 운영하기 위한 연구를 진행하였다. Ganji 등(2008)은 추계학적 퍼지이론을 dynamic Nash 게임 이론과 접목하여 저수지의 용수 공급을 실시하였으며, Karaboga 등(2008)은 타부 검색 알고리즘(tabu search algorithm)을 사용하여 최소한의 퍼지규칙 개수를 찾아 효율적인 퍼지저수지 운영기법을 찾기 위한 연구를 수행하였다. Mehta와 Jain(2009)은 인도의 Ramganga 저수지에 신경회로망이론과 퍼지제어기법을 적용하여 홍수기 최적운영을 실시하였고, Pinthong 등(2009)은 혼합 유전자 알고리즘과 뉴로-퍼지 컴퓨팅(hybrid genetic algorithm and neurofuzzy computing)을 이용하여 다목적댐의 운영에 적용하였다.

국내에서도 홍수방어를 위한 저수지 운영기법 개발과 관련된 다양한 연구가 이루어지고 있다. 심재현 등(2004a, 2004b)은 퍼지제어모형을 이용한 다목적 댐 홍수조절 모형의 개발 및 적용연구를 통해 퍼지제어기법을 사용하여 저수지 저류량과 유입량, 유입량의 변화에 따라 저수지 방류량을

결정하는 몇 개의 퍼지규칙으로 구성된 모형을 개발하였다. 퍼지규칙은 퍼지규칙의 조건부에 해당하는 저수지 저류량과 유입량, 유입량의 변화와 결과부에 해당하는 저수지 방류량의 상호 연관성을 바탕으로 연구자의 경험과 판단에 따라 임의로 퍼지규칙을 구성하고 적용성 검토를 위해 한강유역의 댐을 대상으로 모형을 적용하였다. 정한우(2005)는 전문가의 의견을 반영하여 운영규칙을 생성하는 기존의 방식을 지양하고, 퍼지제어기법에 퍼지타부탐색기법을 적용하여 저수지 제어규칙을 자동적으로 생성할 수 있는 모형을 개발하고 충주댐의 저수지 운영에 적용하였다. 이재웅과 최성규(2007a, 2007b)는 퍼지제어기법과 동적계획법을 연계한 퍼지 동적계획법을 사용하여 불확실성으로 인해 현실적인 운영에 어려움을 겪고 있는 수자원의 효율적인 활용을 위한 운영기법을 개발하고 소양강 다목적 댐에 적용하여 개발된 모형을 검증하였다. 김진호(2011)는 적응형퍼지기법, 동적 계획법 및 신경회로망기법을 사용하여 저수지 운영모형을 구성하고 대청댐의 과거 홍수사상에 적용한 모형의 결과를 비교, 분석하여 적응형퍼지기법을 사용한 저수지 최적운영의 적용성을 평가하였다.

이와 같이 지금까지 진행된 퍼지제어기법을 사용한 저수지운영기법 연구는 주로 퍼지제어기법과 다양한 기법들을 조합하여 단일 저수지 운영에 적용한 연구(Panigrahi와 Mujumdar(2000), Ganji 등(2008), Karaboga 등(2008), Mehta와 Jain(2009), Pinthong 등(2009), 심재현 등(2004a, 2004b), 정한우(2005), 이재웅과 최성규(2007a, 2007b), 김진호(2011))가 주로 이루어졌다. 최근 들어 Deep 등(2009)에 의해 퍼지제어기법에 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 모형을 적용하여 두 개 이상의 저수지를 연계운영하기 위한 연구가 시도되고 있지만 아직은 미흡한 편이다. 본 연구에서는 퍼지제어기법과 최적화 기법을 연속적으로 적용하여 두 개 이상의 저수지의 운영에 적용하였다. 이를 위해 먼저 낙동강 상류의 안동댐과 임하댐 유역에 이상홍수 발생 시 저수지의 최적연계운영을 통해 저수지 하류 안동시 지점의 홍수피해를 최소화하는 것과 동시에 저수지의 안전성을 확보하는 것을 목적으로 최적화기법의 하나인 선형계획법을 사용하여 저수지최적연계운영을 실시하였다. 이후 최적연계운영 결과로부터 저수지 하류의 안동시 지점의 유량과 안동댐 및 임하댐의 각 저수지의 저류량, 유입량 및 유입량의 증감에 따라 방류량을 결정할 수 있는 저수지운영규칙을 추출하고 이를 퍼지제어기법에 적용하여 실제 안동댐과 임하댐에서 각 저수지의 저류량, 유입량, 유입량의 증감 추세 및 안동시 지점에서의 유량을 입력자료로하여 안동댐과 임하댐의 방류량의 결정에 도움을 줄 수 있는 퍼지최적연계운영모형을 개발하였다.

2. 기본 이론

홍수기 저수지의 운영은 댐의 안전성 확보와 댐 하류의 홍수량 조절 등의 상충되는 목표를 모두 고려하여 이루어져야 한다. 특히, PMF와 같은 이상홍수는 양적으로 또는 시간적으로 지금까지 발생했던 기존의 강우사상과는 다른 양상을 가질 것으로 예상되며 기존의 저수지 운영기법과는 다른, 좀 더 신뢰성 있고 정밀한 운영방법을 통해서 운영되어

Fig. 1 Fuzzy optimal reservoir operation flow chart

저야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 시험유역인 안동댐과 임하댐의 저수지로 100년 빈도 홍수량 및 PMP가 유입될 경우에 대한 저수지 최적 운영을 실시하여, 그 결과로부터 저수지 최적 운영규칙을 추출하였고, 추출한 규칙을 인간의 사고체계와 유사한 형태로 추론을 수행하는 퍼지추론기법에 적용하여 저수지 퍼지최적운영모형을 개발하였다(Fig. 1).

2.1 최적화기법

최적화기법은 군사작전의 작전연구(operation research)에서 유래되었으며, 여러 분야에 걸쳐 활발히 연구·응용되어 왔다. 최근 컴퓨터 성능의 발달로 과거에는 해결하지 못했던 복잡한 문제들에 대해서도 최적화기법을 적용하여 그 대안을 찾을 수 있게 되어 최적화기법의 활용빈도가 높아지고 있다. 최적화기법은 가능한 모든 대안에 대해 각각 계산하고 평가하지 않고도 최선의 대안을 찾아낼 수 있는 계산방법이다. 최적화 문제는 다음과 같이 목적함수와 제약조건의 두 부분으로 구성된다.

목적함수 : Optimize $f(\bar{x})$

제약조건 : $g_k(\bar{x}) \leq 0 \quad (k = 1, 2, \dots, m)$

여기서, $\bar{x}$ 는 n 개의 결정변수($x_1, x_2, \dots, x_n$)를 나타내는 벡터이고, $f(\bar{x})$ 는 최적화 문제에서 최대화 혹은 최소화해야 할 목적함수이며, $g_k(\bar{x})$ 는 m 개의 제약조건(constraints)을 나타낸다. 모든 최적화 문제는 목적함수(objective function)와 제약조건의 두 부분으로 구성된다. 목적함수는 모형의 종류에 따라 최대화(maximize) 혹은 최소화(minimize) 문제로 구별할 수 있으며, 제약조건들은 등식, 또는 부등식의 형태로 구분되어진다. 최적화 문제는 목적함수와 제약조건의 형태와 계산 방법에 따라 선형계획법, 비선형계획법, 정수계획법, 동적계획법 등으로 분류되어 진다.

선형계획법(linear programming)과 동적계획법(dynamic programming)은 최적화 문제를 해결하는데 있어서 가장 많이 사용되는 기법들이다. 선형계획법은 최적화 문제를 해결하기 위한 가장 기본적인 방법으로 제한된 자원을 어떻게 합리적으로 배분할 것인가를 결정하기 위한 수학적 계획법(mathematical programming)이며, 선형함수로 표시되는 목적함수와 제약조건을 갖고 최적해(optimum solution)를 찾는 데 있다(고충석, 이병철, 1986). 선형계획법은 문제의 목적함수와 제약조건을 모두 선형식으로 가정하여 전 단계에 걸쳐

하나의 최적해를 구하는 방법으로, 각 단계에서의 최적해는 알 수 없다는 단점이 있지만 비교적 간단하게 문제를 계산할 수 있다는 장점이 있다. 이에 반해 동적계획법은 변수의 형태가 선형이든 비선형이든 상관없이 적용할 수 있는 강력하면서도 널리 사용되는 최적화 기법으로 다단계(multi stage)의 결정과정을 최적화 하는데 사용되며, 단계적 결정과정의 해가 전 과정에 걸쳐 단계별로 구해진다는 장점을 갖고 있으나 이는 변수의 수가 늘어남에 따라 계산 부담이 기하학적으로 늘어나게 된다는 단점으로도 작용하게 된다. 본 연구에서는 목적함수와 제약조건을 모두 선형식으로 나타낼 수 있으므로 선형계획법을 사용하여 안동댐과 임하댐의 저수지 연계운동을 실시하였다.

저수지 최적 연계운영은 시·공간적으로 불균형하게 존재하는 두 개 이상의 수자원을 균형 있게 이용하기 위한 기법으로 본 연구에서는 저수지 하류 지점에서의 최대홍수량을 최소화하는 것을 목적함수로 하고, 각 댐 저수지의 물리적 특성 값을 제약조건으로 하여 두 개의 저수지를 연계 운영하였다. 저수지 연계운영은 하나의 유역 내에 두 개 이상의 댐이 위치할 경우, 임의의 저수지 하나의 상태뿐 아니라 유역 내에 위치한 다른 저수지들의 상태를 전체적으로 고려하여 방류량을 결정하는 운영방안이라 정의할 수 있고, 이와는 대조적으로 저수지의 단독운영은 유역 내에 위치한 다른 저수지들의 상태는 고려하지 않고 단지 특정 댐 하나의 상태에 의해서만 방류량을 결정하는 운영이라 정의할 수 있다. 많은 연구들을 통해 저수지 연계운영은 단독운영에 비하여 이수기의 편익을 증가시키고, 홍수기의 피해를 감소시킬 수 있다고 알려져 있다.

2.2 퍼지집합 이론

인간생활이나 자연현상에는 단지 수치만으로 표현할 수 없는 애매모호함과 불확실성이 산재해 있다. 특히 수자원분야에서는 “저수지의 수위가 높다.”, “상류 유역에 큰 강우가 발생하였다.”, “하류 유역에 유출량이 많다.” 등의 애매모호한 상황에 대한 정의를 필요로 하는 경우가 많다. 이는 일반적으로 사용하고 있는 언어 표현이지만 수학적 연산이나 컴퓨터 언어들은 모두 이진법(binary system)을 사용하고 있기 때문에 이 같은 표현을 수학적 연산이나 컴퓨터 언어로 사용하기 곤란하다. 본 연구에서와 같이 수자원 현상을 다루는 문제에 있어서는 그렇다(yes) 혹은 아니다(no)와 같은 이진법을 사용하여 문제를 풀어나가는 데는 상당한 어려움이 따른다. Zadeh(1965)는 이러한 애매함을 정량화하여 수학적 연산이나 컴퓨터 언어를 통해 논리적으로 접근하기 위해 퍼지집합 이론을 개발하였고, Mamdani와 Assilian(1975)이 퍼지 알고리즘과 복잡한 시스템의 언어모델링을 사용하여 제어에 응용하면서 퍼지제어에 본격적으로 이용되기 시작하였다.

퍼지집합의 기본 개념은 일반집합 개념과의 비교를 통해 쉽게 이해할 수 있다. 원소 x 가 일반집합 A 에 소속하는 정도 혹은 상태(membership)를 $\mu_A(x)$ 로 나타낸다고 할 때, 일반적인 집합에서는 다음과 같이 “ x 는 집합 A 에 속한다. ($\mu_A(x) = 1$)” 혹은 “ x 는 집합 A 에 속하지 않는다($\mu_A(x) = 0$).”의 두 가지 상태로 정의할 수 있다. 이는 원소 x 는 집합 A 에 속하거나 속하지 않는 두 가지 조건 중 하나의 상태만을 가질 수 있

Fig. 2 Reservoir condition definition

는 것을 의미한다.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \in A \\ 0, & \text{if } x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

여기서, $x \in X$ 이며, A 는 X 의 부분집합이다. 이에 반해 퍼지집합이란 어느 집합에 대한 membership이 연속성을 가지는 집합으로, 퍼지집합에 대한 membership을 μ_A 를 사용하여 나타내면 다음과 같이 “ x 는 퍼지집합 A 에 완전히 속한다 ($\mu_A(x)=1$).” 혹은 “ x 는 퍼지집합 A 에 속하지 않는다 ($\mu_A(x)=0$).” 이외에 “ x 는 퍼지집합 A 에 어느 정도 속한다 ($\mu_A(x)=0\sim 1$).”의 세 가지 상태로 정의할 수 있다.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x \in \tilde{A} \\ 0 < \mu_{\tilde{A}} < 1, & \text{if } x \in \tilde{A} \\ 0, & \text{if } x \notin \tilde{A} \end{cases} \quad (2)$$

여기서, $\tilde{A}$ 는 X 영역에서 정의되는 퍼지집합이다.

저수지의 수위를 저수위, 중수위, 고수위의 세 등급으로 평가하고자 한다면 일반집합에서는 Fig. 2(a)와 같이 특정 수위에 따라 등급의 영역이 결정되어 각 수위에 해당하는 하나의 등급에 소속되는 반면, 퍼지집합에서는 Fig. 2(b)와 같이 특정 수위에 따라 각 등급에 속하는 영역이 결정되어 있기는 하지만 그 소속 정도가 서서히 변화하여 임의의 수위 범위에서 하나 혹은 두 개의 등급 영역에 속하게 된다. 퍼지집합을 적용한 저수지의 상태 평가는 인간의 사고방식과 유사하며 정성적인 저수지의 상태를 정량적으로 평가하는데 유용하다.

3. 시험유역 적용

본 연구에서는 이상홍수 발생 시 저수지 최적 연계운영기법을 개발하기 위해 안동댐과 임하댐이 위치한 낙동강 상류

Fig. 3 Map of andong and imha reservoir basins

유역을 대상으로 연구를 진행하였다. 안동댐과 임하댐은 낙동강의 상류에 위치한 안동시로부터 각각 5.8 km, 17.4 km 상류에 위치하고 있으며 임하댐으로부터 약 7.8 km 하류에서 길안천이 유입된다(Fig. 3). 안동댐은 낙동강 수계에 처음 건설된 댐으로 4대강 유역종합개발계획의 일환으로 1976년 10월에 준공되었으며, 낙동강유역내의 수자원을 개발하여 댐 하류 지역에 관개용수 및 생·공용수를 공급하고 발전 및 홍수조절을 목적으로 낙동강 상류에 건설된 사력댐이다. 임하댐은 4대강 유역 종합개발계획의 하나인 다목적 수자원개발사업에 의해 건설된 다목적 사력댐으로 1993년 12월 31일 준공되었으며, 낙동강수계가 보유하고 있는 수자원을 고도로 개발하여 댐하류 유역에 위치한 도시, 공업지역 및 농경지에 생활, 공업 및 관개용수를 공급하는 동시에 수력에너지 개발과 홍수조절을 목적으로 하는 다목적댐 사업으로 건설되었다.

Fig. 4 Schematic diagram

3.1 최적 연계운전을 위한 모형 구성

시험 유역은 Fig. 4와 같이 안동시 상류에 안동댐과 임하댐이 병렬로 위치하며 임하댐 하류에서 반변천의 지류인 길안천이 유입된다. 본 연구에서 저수지 연계운전을 위한 조절 지점(CP: control point)으로는 안동시 지점(안동대교 지점)을 선정하였다. 안동시를 기준으로 안동댐은 낙동강 본류를 따라 5.8 km 상류에 위치하고 있으며, 임하댐은 낙동강의 지류인 반변천을 따라 17.4 km 상류에 위치하고 있다. 안동대교를 기준으로 홍수와 도달시간을 고려할 경우 임하댐~안동시 구간은 1.25 시간, 안동댐~안동시 구간은 0.32 시간이 소요되는 것으로 나타났다. 따라서, 임하댐~안동시 구간이 안동댐~안동시 구간의 4 배에 달하게 되어 최적화 모형에서는 하도추적을 위한 하도의 구간을 안동댐~안동시 구간은 하나의 구간으로 설정하고, 임하댐~안동시 구간은 네 개의 소구간으로 분할하였다. 임하댐 하류에서 유입되는 지류인 길안천은 임하댐~안동시 구간의 가운데에서 유입되어 두 개 소구간의 하도추적을 거치도록 모형을 구성하였다. 하도추적에는 수문학적 홍수추적방법인 Muskingum 방법을 사용하였다.

안동댐에서 방류한 홍수가 안동시에 도달할 때까지 약 20 분의 시간이 소요되는 것을 감안하여 분석시간 간격은 10 분으로 설정하였으며, 각 댐의 유입 수문자료 또한 모두 10 분 간격의 자료로 변환하여 사용하였다.

최적화 모형에 사용된 목적함수와 주요 제약조건을 식 (3)~(18)을 통해 나타내었다. 최적화 모형은 안동시 홍수량의 최대값을 최소화하는 것을 목적함수(식 (3))로 하였으며, 안동시의 홍수량은 안동댐과 임하댐으로부터 방류되는 유량을 하도추적하고 길안천의 지류유입량을 고려하여 산정하였다(식 (14)~(18)). 최적화 모형에 사용된 제약조건은 식 (4)~(13)과 같다. 각 저수지의 저류량은 저수위에서부터 계획홍수위에 해당하는 저류량의 범위 내에서 변하는 것으로 제한하였고, 방류량의 최대값은 치수능력 증대사업을 통해 현재 설치중인 각 댐의 비상여수로 용량을 포함한 용량의 범위로 제한하였다.

$$\text{Objective Function : } \min[\max[QR_A(t) + QR_{I4}(t)]] \quad (3)$$

Constraint :

$$S_A(t+1) = S_A(t) + IN_A(t) - Q_A(t) \quad (4)$$

$$S_I(t+1) = S_I(t) + IN_I(t) - Q_I(t) \quad (5)$$

$$S_A(t) < S_A(\max) \quad (6)$$

$$S_A(t) > S_A(\min) \quad (7)$$

$$S_I(t) < S_I(\max) \quad (8)$$

$$S_I(t) > S_I(\min) \quad (9)$$

$$\alpha Q_A(t) < Q_A(t+1) < \beta Q_A(t) \quad (10)$$

$$\gamma Q_I(t) < Q_I(t+1) < \delta Q_I(t) \quad (11)$$

$$Q_A(t) < Q_A(\max) \quad (12)$$

$$Q_I(t) < Q_I(\max) \quad (13)$$

$$QR_A(t) = C_{A0}Q_A(t) + C_A(t-1) + C_{A2}QR_A(t-1) \quad (14)$$

$$QR_{I1}(t) = C_{I1,0}Q_I(t) + C_{I1,1}Q_I(t-1) + C_{I1,2}QR_{I1}(t-1) \quad (15)$$

$$QR_{I2}(t) = C_{I2,0}QR_{I1}(t) + C_{I2,1}QR_{I1}(t-1) + C_{I2,2}QR_{I2}(t-1) \quad (16)$$

$$QR_{I3}(t) = C_{I3,0}QR_{I2}(t) + C_{I3,1}QR_{I2}(t-1) + C_{I3,2}QR_{I3}(t-1) \quad (17)$$

$$QR_{I4}(t) = C_{I4,0}QR_{I3}(t) + C_{I4,1}QR_{I3}(t-1) + C_{I4,2}QR_{I4}(t-1) \quad (18)$$

여기서, $QR_A(t)$ 는 안동댐에서 방류하여 t 시간에 안동시에 도달한 유량, $QR_{I1}(t) \sim QR_{I4}(t)$ 는 임하댐에서 방류된 후 각 하도 구간의 하도추적을 통해 t 시간에 각 구간 종점에 도달한 유량, $SA(t)$ 는 t 시간에 안동댐 저수지의 저류량, $SI(t)$ 는 t 시간에 임하댐 저수지의 저류량, $IN_A(t)$ 는 t 시간의 안동댐 저수지의 유입량, $IN_I(t)$ 는 t 시간의 임하댐 저수지의 유입량, $Q_A(t)$ 는 시간에 안동댐 방류량, $Q_I(t)$ 는 시간에 임하댐 방류량, $S_A(\max)$, $S_I(\max)$ 는 안동댐과 임하댐의 각 저수지의 최대 저류량, $S_A(\min)$, $S_I(\min)$ 은 안동댐과 임하댐 각 저수지의 사수위에서의 저류량을 의미한다. 또, α , β , γ , δ 는 각각 안동댐과 임하댐의 방류량의 변화 허용한계비율이며, $C_{I1,0}, C_{I1,1}, C_{I1,2} \sim C_{I4,2}$ 는 임하댐~안동시 사이의 각 하도구간에 대한 Muskingum 하도추적에 사용되는 계수이다.

최적화 모형에서 안동댐, 임하댐의 각 저수지 및 길안천의 유입 홍수량은 이상홍수 상황을 고려하여 각 댐에서는 100 년 빈도 및 PMF 홍수량을 사용하였고, 길안천은 200년 빈도의 홍수량을 사용하였다. 실제 이와 같은 큰 홍수량이 각 저수지 및 길안천을 통해 동시에 유입되는 상황이 발생할 확률은 낮지만 극한의 상황을 가정하기 위해 위와 같은 상황을 가정하였다. 각 저수지의 유입 홍수량은 안동댐 저수지의 경우 18시간, 임하댐 저수지의 경우 24시간의 지속시간을 갖는 호우를 통해 산정되어, 홍수 지속시간의 차이가 있어 각 저수지에 공통적으로 홍수유입 시점으로부터 50 시간 (10 분 간격 300 구간, 3,000 분)까지의 유입량 자료를 사용하였다. 각 홍수량은 전체 50 시간의 자료를 사용하였으나 최적화 모형의 특성상 전체기간의 자료를 모두 사용할 경우 전 구간에 대한 유입량의 크기와 지속시간, 첨두 발생시간 등의 유입특성을 사전에 모두 알게 되어 첨두 유입량 발생 시간까지는 사전방류가 가능하고, 첨두 유입량 발생 이후에는 유입량 감소에 따라 저류에 중점을 둔 운영이 가능하게

Fig. 5 The peak location of inflow

된다. 따라서 실제 운영 상황과는 상이한 방식으로 최적운영을 하게 되므로 유입량이 작은 초기와 말기 부분을 제외하고 침투값을 포함하는 전체 길이의 1/3의 자료(100 구간)만을 모형의 입력자료로 사용하고, 침투값의 위치를 전·중·후반부에 위치시켜 다양한 형태의 홍수가 유입될 경우에 대해 모의하였다. Fig. 5를 통해 침투부의 위치에 따른 PMF 유입량 구성의 예를 나타내었다.

최적화 모형에서 저수지로 100년 빈도 홍수량 및 PMF 유입 시 발생할 수 있는 다양한 상황을 모의하기 위해 저수지 초기 저류량(각 저수지별 3개 조건)과 유입홍수 수문곡선(각 저수지별 3개 조건)을 변화시켜 다양한 형태의 조건(설계홍수량별 81개 조합)에 대해 모의하였다(Table 1). 각 저수지 초기 저류량은 각 저수지별 저수지 수위를 기준으로 비교적 저류량이 많은 상태에 대해 모의하였으며, 계획홍수위(7VB: Very Big), 홍수기 제한수위(6BI: Big), 제한수위-여수로 월류부 수위의 중간수위(5MB: Medium Big)의 세 가지 값을 초기값으로 사용하였다. 저수지 저류량 제약조건은 각 저수지의 홍수기 제한수위를 기본으로 하였으나 PMF 유입 최적운영 중 모형의 결과가 불능해(infeasible solution)에 도달하여 홍수 조절에 실패하는 경우가 발생하였다. 이러한 경우에 대해서는 제약조건을 조절하여 가능해(feasible solution)에 도달할 수 있도록 하였다. 저류량 제약조건을 조절하기 위해 저류량 제약조건을 '홍수기 제한수위' - '계획홍수위' - '여유고를 고려한 댐 정상부수위' 순서로 최대 저류량 제약조건을 한 단계씩 높게 조절하여 순차적으로 적용하였다. 각 저수지의 유입유량의 형태를 변화시키기 위해서는 침투유량이 전체유입량의 어느 부분에 위치하는가에 따라 전반부(Ahead)·중반부(Middle)·후반부(Back)로 구분하였다(Table 1).

3.2 최적화 모형 운영 결과

최적화 모형 운영 결과 100년 빈도 홍수량 시나리오에서는 전체 81 개의 시나리오 모두 가능해에 도달하였으나, PMF 시나리오에서는 9 개의 case에서 불능해에 도달하였다. 각 모형을 <안동댐 저수지 유입량 - 임하댐 저수지 유입량 - 안동댐 저수지 초기수위 - 임하댐 저수지 초기수위>순서의

Table 1. Optimal Model Operation Conditions

Inflow (location of the peak)		Initial Storage	
Andong Reservoir	Imha Reservoir	Andong Reservoir	Imha Reservoir
<Ahead>	<Ahead>	<5 MB>	<5 MB>
<Middle>	<Middle>	<6 BI>	<6 BI>
<Back>	<Back>	<7 VB>	<7 VB>

영문이니셜 및 숫자 순서로 표기할 때, 불능해에 도달한 경우는 MA75, MA76, MA77, MM75, MM76, MM77, MB75, MB76, MB77의 9 개 case로 상대적으로 저류용량이 큰 안동댐의 저류량이 홍수위에 도달한 상태에서 이상홍수가 유입될 경우 홍수조절이 어려운 것으로 추정된다. 본 연구에서 검토한 유입 조건에서는 안동댐의 저수지로 유입되는 홍수의 침투부가 가운데 위치할 경우 홍수조절이 어려운 것으로 나타났다. 본 연구에서는 PMF 시나리오에서 불능해에 도달한 9 개 case는 배제하고 100년 빈도 홍수량 유입 시나리오 81 개 case와 PMF 시나리오의 72 개의 case만을 이용하여 저수지 최적 운영규칙을 추출하였다.

본 연구에서는 안동시 지점의 홍수량을 최소화하는 것을 목적함수로 하고, 저수지 저류량과 방류량의 범위 등을 제약조건으로 하여 저수지 운영을 실시하였다. 이상홍수 발생 시 저수지의 다양한 상황을 모의하기 위해 부여한 저수지의 초기 조건은 모두 여수로의 월류부 수위 이상의 수위에 해당하는 저류량으로 설정되어 모든 경우 전 시간에 대해 여수로 방류가 가능한 수위가 유지되었지만, 저수지 수위 - 방류량에 관련된 제약조건을 설정하지 않았기 때문에 실제 방류될 수 있는 방류량을 초과하여 방류하는 경우가 발생하였다. 이는 실제 상황과 부합되지 않는 결과이지만 본 연구에서는 최적운영의 결과보다는 최적운영의 결과로부터 운영규칙을 추출하여 퍼지제어기법에 적용하는 것을 중점으로 두었기에 본 최적화 결과를 사용하여 연구를 진행하였다.

3.3 퍼지 기법의 적용

이상홍수 발생 시 안동-임하댐 저수지의 최적운영을 위한 퍼지운영기법을 개발하기 위해서는 먼저 어떠한 조건(입력변수)을 고려하여 저수지를 운영할 것인가 하는 것이 중요한 요소로 작용한다. 본 연구에서는 안동댐과 임하댐 각 저수지의 홍수기 운영은 하류에 위치한 주요 도시인 안동시의 홍

Table 2. Input Variables

	Considered Condition	Input Variable	The Number of Variables
Andong Reservoir	Storage Inflow Change of Inflow	STOa INa(t) INa(trend)	3
Imha Reservoir	Storage Inflow Change of Inflow	STOi INi(t) INi(trend)	3
Andong City	Flow rate	DISCHa	1
Sum			7

Table 3. Membership Function for Each Variable

Variable	Min. Value	Max. Value	Number of MF	Type of MF	Interval of Each MF
Storage	at the top of inactive pool	at the top of flood pool	7	triangular MF	basically equidistant division · top of MB : storage at the crest elevation · top of BI : storage at the top of conservation pool · top of VB : storage at the top of flood pool
Inflow	0	Max. inflow at PMF	7	triangular MF	equidistant division
Change of Inflow	0	1	2	trapezoidal MF	decrease : 0 the other : 1
Flow rate of Andong	0	Max. disch. of PMF	7	triangular MF	equidistant division
Discharge	0	Maximum out flow*	7	triangular MF	equidistant division

*Maximum release through emergency spillway

수 저감이 목적이므로 안동시 지점과 안동댐 및 임하댐 저수지의 각 지점 상황을 고려할 수 있도록 입력변수를 선정하였다. 퍼지기법을 적용하기 위해 Table 2와 같이 저수지의 상황을 고려하기 위한 입력변수로는 각 저수지의 저류량(STOa, STOi)과 유입량(INa(t), INi(t)) 및 유입량의 증감(INa(trend), INi(trend))을 사용하였고, 안동시 지점의 상황을 고려하기 위한 입력변수로는 안동시 지점의 유량(DISCHa)을 입력변수로 하여 총 7 개의 입력변수를 구성하였다. 저수지 운영을 위한 퍼지결과(출력변수)는 안동댐과 임하댐의 저수지 방류량으로 하였다.

각 변수를 퍼지화하기 위해 각 댐 저수지의 제원과 유입량 및 유출량자료와 안동시 지점에서의 유량 자료의 특성을 고려하여 퍼지 소속함수(membership function)를 구성하였다. 먼저, 유입량의 변화를 제외한 모든 변수를 7 개의 소속함수(VS, SM, MS, MD, MB, BI, VB: Very Small, Small, Medium Small, Medium, Medium Big, Big, Very Big)로 구성하였고, 유입량 변화에 대한 변수는 이전 시간에 비해 현재의 유입량의 증가(Increase)와 감소(Decrease) 두 가지만을 고려하도록 이진변수로 소속함수를 구성하였다. 각 저수지 유입량과 방류량, 그리고 안동시지점 유량의 소속함수 값은 최소값과 최대값을 등간격으로 분할하여 구성하였고, 각 저수지의 저류량에 대한 입력변수는 저수위에서부터 계획홍수위까지의 저류량을 등간격으로 분할한 후 MD의 꼭지점을 월류부수위에서의 저류량으로 하고 BI의 꼭지점을 상시만수위에서의 저류량 값으로 설정하였다(Table 3, Fig. 6~9).

3.4 퍼지 규칙 구성 및 종합

본 연구에서는 저수지 최적연계운영을 위한 퍼지 운영규칙을 구성하기 위해 안동댐과 임하댐의 저수지 최적연계운영 결과로부터 최적운영 규칙을 추출하였다. 최적운영 규칙을 퍼지제어기법에 적용하기 위해 앞에서 선정한 퍼지 입·출력 변수의 소속함수를 기준으로 최적운영결과를 정리하였다. 최적화모형을 이용하여 모의된 결과는 일반적인 입·출력값의 형태(숫자)로 되어 있으므로 이를 앞에서 정의한 변수별 소속함수를 통해 퍼지화하여 퍼지규칙을 구성하였다. 7 개의 소속함수를 가진 7 개의 변수와 2 개의 소속함수를 가진 2 개의 변수를 통해 만들어진 규칙은 이론적으로 각 시나리오 별 약 3백만개의 규칙이 생성될 수 있다. 본 연구에서 추출한 퍼지 규칙의 수는 61,682개였으며, 그 중 입력변수의

(a) Storage of Andong Reservoir

(b) Inflow of Andong Reservoir

(c) Change of Inflow

Fig. 6 Input variable for andong reservoir

퍼지규칙이 동일한 경우에 대해서는 댐 방류량을 평균하여 하나의 규칙으로 정리하고, 안동댐과 임하댐의 각 저수지 중 어느 저수지에서도 방류가 없는 경우는 규칙에서 제외하여 최종 224 개의 규칙을 추출하였다(Table 4).

3.5 GUI 개발

이상홍수 발생 시 개발된 운영규칙을 사용하여 누구나 쉽게 저수지 방류량을 조절할 수 있게 하기 위해 Fig. 10과 같은 GUI를 개발하였다. GUI는 안동댐과 임하댐 저수지에

(a) Storage of Imha Reservoir

Fig. 8 Input variable for andong city

(b) Inflow of Imha Reservoir

(a) Discharge of Andong Reservoir

(c) Change of Inflow

(b) Discharge of Imha Reservoir

Fig. 7 Input variable for imha reservoir

Fig. 9 Output variables

Table 4. 최종 퍼지규칙

No.	STOA	IN At	IN Atre	STO I	IN It	IN Itre	Disch AS	Qa	Qi	No.	STOA	IN At	IN Atre	STO I	IN It	IN Itre	Disch AS	Qa	Qi
1	5	1	2I	7	1	2I	1	1	3	113	6	3	1D	7	3	1D	5	3	3
2	5	1	2I	7	1	2I	2	1	3	114	6	3	1D	7	3	2I	3	1	2
3	5	1	2I	7	1	2I	3	1	3	115	6	3	1D	7	3	2I	4	3	3
4	5	1	2I	7	2	2I	1	1	3	116	6	3	1D	7	3	2I	5	3	3
5	5	1	2I	7	2	2I	2	1	3	117	6	3	2I	5	1	2I	3	4	1
6	5	1	2I	7	2	2I	3	1	3	118	6	3	2I	5	1	2I	4	4	1
7	5	2	2I	6	1	2I	3	1	2	119	6	3	2I	5	2	2I	3	4	1
8	5	2	2I	6	2	2I	3	1	2	120	6	3	2I	5	2	2I	4	4	1
9	5	2	2I	7	1	2I	1	1	3	121	6	3	2I	6	2	1D	3	3	1
10	5	2	2I	7	1	2I	2	1	3	122	6	3	2I	6	2	1D	4	3	1
11	5	2	2I	7	1	2I	3	1	3	123	6	3	2I	6	2	2I	3	3	1
12	5	2	2I	7	2	1D	3	1	2	124	6	3	2I	6	2	2I	4	3	1
13	5	2	2I	7	2	2I	1	1	3	125	6	3	2I	6	3	1D	3	3	1
14	5	2	2I	7	2	2I	2	1	3	126	6	3	2I	6	3	1D	4	3	1
15	5	2	2I	7	2	2I	3	1	3	127	6	3	2I	6	3	2I	3	3	1
16	5	2	2I	7	3	1D	3	1	2	128	6	3	2I	6	3	2I	4	3	1
17	5	2	2I	7	3	2I	3	1	2	129	6	3	2I	7	1	2I	3	5	1
18	5	3	1D	6	1	2I	3	1	2	130	6	3	2I	7	1	2I	4	4	2

Table 4. 계속

No.	STOA	IN At	IN Atre	STO I	IN It	IN Itre	Disch AS	Qa	Qi	No.	STOA	IN At	IN Atre	STO I	IN It	IN Itre	Disch AS	Qa	Qi
19	5	3	1D	6	2	2I	3	1	2	131	6	3	2I	7	1	2I	5	5	1
20	5	3	1D	7	1	1D	3	1	2	132	6	3	2I	7	2	1D	4	2	3
21	5	3	1D	7	1	2I	3	1	2	133	6	3	2I	7	2	1D	5	2	3
22	5	3	1D	7	2	1D	3	1	2	134	6	3	2I	7	2	2I	3	6	1
23	5	3	1D	7	2	2I	3	1	2	135	6	3	2I	7	2	2I	4	3	2
24	5	3	1D	7	3	1D	3	1	2	136	6	3	2I	7	2	2I	5	3	1
25	5	3	1D	7	3	2I	3	1	2	137	6	3	2I	7	3	1D	4	3	2
26	5	3	2I	6	1	2I	3	1	2	138	6	3	2I	7	3	1D	5	3	3
27	5	3	2I	6	2	2I	3	1	2	139	6	3	2I	7	3	2I	4	3	2
28	5	3	2I	7	1	2I	1	1	3	140	6	3	2I	7	3	2I	5	3	1
29	5	3	2I	7	1	2I	2	1	3	141	7	1	2I	5	1	2I	3	4	1
30	5	3	2I	7	1	2I	3	1	2	142	7	1	2I	5	2	2I	3	4	1
31	5	3	2I	7	2	1D	3	1	2	143	7	1	2I	6	2	2I	3	4	1
32	5	3	2I	7	2	2I	1	1	3	144	7	1	2I	7	1	2I	3	5	1
33	5	3	2I	7	2	2I	2	1	3	145	7	1	2I	7	1	2I	4	4	1
34	5	3	2I	7	2	2I	3	1	2	146	7	1	2I	7	1	2I	5	5	1
35	5	3	2I	7	3	1D	3	1	2	147	7	1	2I	7	2	2I	3	5	1
36	5	3	2I	7	3	2I	3	1	2	148	7	1	2I	7	2	2I	4	4	1
37	6	1	2I	5	1	2I	3	4	1	149	7	1	2I	7	2	2I	5	5	1
38	6	1	2I	5	2	2I	3	4	1	150	7	2	1D	6	1	1D	3	2	1
39	6	1	2I	6	2	2I	3	4	1	151	7	2	1D	6	1	1D	4	3	1
40	6	1	2I	7	1	2I	3	5	1	152	7	2	1D	6	2	1D	3	2	1
41	6	1	2I	7	1	2I	4	4	1	153	7	2	1D	6	2	1D	4	3	1
42	6	1	2I	7	1	2I	5	5	1	154	7	2	1D	6	2	2I	4	3	1
43	6	1	2I	7	2	2I	3	4	1	155	7	2	1D	6	3	1D	4	3	1
44	6	1	2I	7	2	2I	4	4	1	156	7	2	1D	6	3	2I	4	3	1
45	6	1	2I	7	2	2I	5	5	1	157	7	2	1D	7	1	1D	3	2	1
46	6	2	1D	6	1	1D	2	1	1	158	7	2	1D	7	1	1D	4	3	2
47	6	2	1D	6	1	1D	3	2	1	159	7	2	1D	7	1	1D	5	2	3
48	6	2	1D	6	1	1D	4	3	1	160	7	2	1D	7	2	1D	3	1	1
49	6	2	1D	6	2	1D	2	1	1	161	7	2	1D	7	2	1D	4	1	2
50	6	2	1D	6	2	1D	3	2	1	162	7	2	1D	7	2	1D	5	2	2
51	6	2	1D	6	2	1D	4	3	1	163	7	2	1D	7	2	2I	4	3	2
52	6	2	1D	6	2	2I	4	3	1	164	7	2	1D	7	3	1D	4	2	2
53	6	2	1D	6	3	1D	4	3	1	165	7	2	1D	7	3	2I	4	2	2
54	6	2	1D	6	3	2I	4	3	1	166	7	2	2I	5	1	2I	3	4	1
55	6	2	1D	7	1	1D	3	1	2	167	7	2	2I	5	1	2I	4	4	1
56	6	2	1D	7	1	1D	5	2	3	168	7	2	2I	5	2	2I	3	4	1
57	6	2	1D	7	2	1D	2	1	1	169	7	2	2I	5	2	2I	4	4	1
58	6	2	1D	7	2	1D	3	1	2	170	7	2	2I	6	2	2I	3	3	1
59	6	2	1D	7	2	1D	4	2	2	171	7	2	2I	6	2	2I	4	4	1
60	6	2	1D	7	2	1D	5	2	3	172	7	2	2I	6	3	2I	3	3	1
61	6	2	1D	7	2	2I	3	1	2	173	7	2	2I	6	3	2I	4	4	1
62	6	2	1D	7	2	2I	4	1	4	174	7	2	2I	7	1	2I	3	5	1
63	6	2	1D	7	3	1D	3	1	2	175	7	2	2I	7	1	2I	4	4	1
64	6	2	1D	7	3	1D	4	2	3	176	7	2	2I	7	1	2I	5	5	1
65	6	2	1D	7	3	2I	3	1	2	177	7	2	2I	7	2	2I	3	5	1

Table 4. 계속

No.	STOA	IN At	IN Atre	STO I	IN It	IN Itre	Disch AS	Qa	Qi	No.	STOA	IN At	IN Atre	STO I	IN It	IN Itre	Disch AS	Qa	Qi
66	6	2	1D	7	3	2I	4	1	4	178	7	2	2I	7	2	2I	4	4	1
67	6	2	2I	5	1	2I	3	3	1	179	7	2	2I	7	2	2I	5	3	1
68	6	2	2I	5	1	2I	4	4	1	180	7	2	2I	7	3	2I	4	4	1
69	6	2	2I	5	2	2I	3	3	1	181	7	3	1D	5	1	2I	4	3	1
70	6	2	2I	5	2	2I	4	4	1	182	7	3	1D	5	2	2I	4	3	1
71	6	2	2I	6	2	1D	3	3	1	183	7	3	1D	6	1	1D	3	3	1
72	6	2	2I	6	2	2I	3	3	1	184	7	3	1D	6	1	1D	4	3	1
73	6	2	2I	6	2	2I	4	4	1	185	7	3	1D	6	2	1D	3	3	1
74	6	2	2I	6	3	1D	3	3	1	186	7	3	1D	6	2	1D	4	3	1
75	6	2	2I	6	3	2I	3	3	1	187	7	3	1D	6	2	2I	4	3	1
76	6	2	2I	6	3	2I	4	4	1	188	7	3	1D	6	3	1D	3	3	1
77	6	2	2I	7	1	2I	3	5	1	189	7	3	1D	6	3	1D	4	3	1
78	6	2	2I	7	1	2I	4	3	1	190	7	3	1D	6	3	2I	3	3	1
79	6	2	2I	7	1	2I	5	5	1	191	7	3	1D	6	3	2I	4	3	1
80	6	2	2I	7	2	1D	4	3	2	192	7	3	1D	7	1	1D	3	2	1
81	6	2	2I	7	2	2I	3	5	1	193	7	3	1D	7	1	1D	4	2	2
82	6	2	2I	7	2	2I	4	4	1	194	7	3	1D	7	1	1D	5	2	3
83	6	2	2I	7	2	2I	5	3	1	195	7	3	1D	7	1	2I	4	3	1
84	6	2	2I	7	3	1D	4	4	1	196	7	3	1D	7	2	1D	3	2	1
85	6	2	2I	7	3	2I	4	4	1	197	7	3	1D	7	2	1D	4	2	2
86	6	2	2I	7	3	2I	5	3	2	198	7	3	1D	7	2	1D	5	2	2
87	6	3	1D	5	1	2I	4	3	1	199	7	3	1D	7	2	2I	4	3	1
88	6	3	1D	5	2	2I	4	3	1	200	7	3	1D	7	2	2I	5	4	1
89	6	3	1D	6	1	1D	2	1	1	201	7	3	1D	7	3	1D	4	2	2
90	6	3	1D	6	1	1D	3	3	1	202	7	3	1D	7	3	1D	5	2	2
91	6	3	1D	6	1	1D	4	3	1	203	7	3	1D	7	3	2I	4	3	2
92	6	3	1D	6	2	1D	2	1	1	204	7	3	1D	7	3	2I	5	3	2
93	6	3	1D	6	2	1D	3	3	1	205	7	3	2I	5	1	2I	3	4	1
94	6	3	1D	6	2	1D	4	3	1	206	7	3	2I	5	1	2I	4	4	1
95	6	3	1D	6	2	2I	3	1	2	207	7	3	2I	5	2	2I	3	4	1
96	6	3	1D	6	2	2I	4	3	1	208	7	3	2I	5	2	2I	4	4	1
97	6	3	1D	6	3	1D	3	3	1	209	7	3	2I	6	2	1D	3	3	1
98	6	3	1D	6	3	1D	4	3	1	210	7	3	2I	6	2	1D	4	3	1
99	6	3	1D	6	3	2I	3	3	1	211	7	3	2I	6	2	2I	3	3	1
100	6	3	1D	6	3	2I	4	3	1	212	7	3	2I	6	2	2I	4	3	1
101	6	3	1D	7	1	1D	3	1	2	213	7	3	2I	6	3	1D	4	3	1
102	6	3	1D	7	1	1D	4	1	3	214	7	3	2I	6	3	2I	3	3	1
103	6	3	1D	7	1	2I	4	3	1	215	7	3	2I	6	3	2I	4	3	1
104	6	3	1D	7	2	1D	2	1	1	216	7	3	2I	7	1	2I	3	5	1
105	6	3	1D	7	2	1D	3	1	2	217	7	3	2I	7	1	2I	4	4	1
106	6	3	1D	7	2	1D	4	2	3	218	7	3	2I	7	1	2I	5	5	1
107	6	3	1D	7	2	1D	5	2	3	219	7	3	2I	7	2	1D	4	2	2
108	6	3	1D	7	2	2I	3	1	2	220	7	3	2I	7	2	2I	3	5	1
109	6	3	1D	7	2	2I	4	3	2	221	7	3	2I	7	2	2I	4	4	1
110	6	3	1D	7	2	2I	5	4	2	222	7	3	2I	7	2	2I	5	3	1
111	6	3	1D	7	3	1D	3	1	2	223	7	3	2I	7	3	2I	4	4	1
112	6	3	1D	7	3	1D	4	2	3	224	7	3	2I	7	3	2I	5	3	2

(1: very small, 2: small, 3: medium small, 4: medium, 5: medium big, 6: big, 7: very big, 1D: decrease, 2I: increase를 나타냄)

Fig. 10 GUI for reservoir operation during abnormal flood

서의 현재 시간의 저류량과 유입량 및 안동시 지점에서의 유량을 입력하고, 각 저수지 유입량의 증감 현황을 설정한 후 실행 버튼을 클릭하면 이상홍수 시 저수지 최적 연계운영을 위해 작성된 퍼지최적운영규칙을 통해 산정된 각 저수지에서의 방류량이 출력 되도록 구성되었다.

3.6 시험유역 적용 결과

개발된 저수지 운영 모형을 사용하여 2002년 8월 30일~9월 3일까지 5일간의 안동댐과 임하댐의 실측 유입량자료를 사용하여 저수지 운영한 결과를 Fig. 11을 통해 나타내었다. Fig. 11에서 IN_a , IN_i 는 안동댐과 임하댐 저수지의 실측유입량, Q_a , Q_i 는 본 연구에서 개발된 모형을 통해 모의된 각 저수지의 방류량, $DISCH$ 는 안동시 지점의 계산된 유량을 의미하며, $Obs. StoA$, $Obs. StoI$ 는 각 저수지의 관측 저수량, STO_a , STO_i 는 모의운영을 통한 저수지 저류량을 나타낸다.

저수지 운영 결과를 개략적으로 살펴보면 홍수 유입 이전 저류량이 상대적으로 많은 임하댐의 저수지에서는 사전방류를 실시하고, 홍수 유입 시 각 저수지에서는 많은 양의 방류를 통해 저수지 저류량을 낮추어 홍수기 운영을 실시하고 있으며, 홍수 유입이 끝난 후에는 방류량을 줄여서 안정적인 운영을 수행 한 것으로 평가할 수 있다.

그렇지만 전체적으로 유입량이 작을 때에도 비교적 많은 양의 유량을 방류하여 저수지 저류량이 지속적으로 줄어드는 경향을 보이고 있다. 본 연구에서 이상홍수 발생 시 저수지의 안전성과 저수지 하류의 주요지점의 홍수피해를 최소화하기 위한 방류량 결정이 주가 되고 있는 반면, 저수지 저류를 통한 용수 확보에 대한 고려가 충분하지 않기 때문에 작은 방류량에 대한 퍼지규칙이 적고 규칙이 있더라도 가중치가 상대적으로 낮기 때문에 발생 되는 문제이다. 이는, 추후 연구를 통해 적은 양의 유량을 방류시키는 운영규칙을 추가하고 해당되는 규칙에 대한 가중치를 높여줄 경우 어느

Fig. 11 Simulation result of developed model

정도 해결 가능 할 것으로 판단된다.

또, 임하댐 저수지에서 사전방류를 수행함에 있어서 방류량 변화의 진폭이 크게 발생하고 있다. 이는 본 연구에서 개발한 모형이 홍수유입 전체 구간에 대한 자료를 사용하여 연속적인 저수지 운영을 모의하기 위한 모형이 아닌 특정 시간에서의 저수지 유입량, 유입량의 변화와 저수지 저류량 및 하류 주요지점에서의 유출량 자료를 통해 다음 시간의 저수지 방류량을 결정하는 방류량 결정 모형으로 연속적인 방류량의 변화를 제어할 수 없기 때문에 발생하는 문제로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 안동·임하댐의 저수지 상류에 100년 빈도 홍수량 및 PMF에 해당하는 이상홍수 발생 시 댐의 하류에 위치한 안동시 지점의 유출량을 최소화하는 것을 목적으로 하여 최적화 기법인 선형계획법과 퍼지제어기법을 적용한 퍼지최적저수지운영기법을 개발하였다. 저수지 최적운영에서는 안동댐과 임하댐의 저수지 상류에 각각 100년 빈도의 강우가 발생할 경우 홍수 유입 시나리오와 PMP 발생 시 PMF 유입 시나리오에 대해 저수지 최적운영을 실시하였다. 각 시나리오별 81개 case의 모형을 구축하고 운영하였으나, PMF 시나리오에서는 9개 case에서 홍수방어에 실패하는 불능해에 도달하였다. 불능해에 도달한 경우를 제외하고 나머지 case에 대한 최적운영 결과로부터 각 댐 저수지의 저류량, 유입량, 유입량의 증감 및 안동시 지점의 유출량을 입력변수로 하고 안동댐과 임하댐의 저수지 방류량을 출력변수로 하는 퍼지규칙으로 정리하였으며, 동일한 입력변수의 조합을 갖는 규칙을 통합하고 저수지 방류가 없는 경우를 제외하여 224개의 퍼지규칙으로 정리하였다. 정리된 퍼지규칙을 사용하여 안동댐과 임하댐의 저수지 저류량, 유입량, 유입량의 변화 및 안동시 지점의 유량을 입력하면 각 저수지의 방류량을 결정할 수 있는 저수지 운영 GUI를 개발하였으며, 2002년 8월 말 발생한 홍수사상에 적용해 보았다.

본 연구에서는 저수지 최적운영에서 여수로 방류에 대한

저수지의 수위에 따른 방류량 제약조건이 고려되지 못하여 실제 방류 가능량 이상의 방류를 하게 되는 문제가 발생하였다. 그러나 본 연구에서는 연구의 중점이 저수지의 최적운영이 아니라 최적운영의 결과로부터 추출한 운영규칙을 퍼지제어기법에 적용하여 저수지 운영에 있어서 의사결정에 도움을 주는 것에 있으므로 저수지 최적운영결과를 그대로 사용하였다. 또, 개발된 모형을 사용한 결과 해당 시점에서의 각 저수지와 하류 지점의 상황을 바탕으로 방류량을 결정할 수는 있었지만, 시간적인 연속성을 고려하지 못하여 홍수 유입 초기 방류량의 증감 폭이 크고, 이상홍수와 같은 큰 홍수에 대한 방어기능에 집중되어 비교적 많은 양을 방류하는 형태를 보였으며, 시간적인 유황 변동을 고려하지 못하는 한계를 보였다.

지금까지 퍼지제어기법을 이용한 저수지 운영과 관련한 연구는 퍼지제어기법과 다양한 최적화 기법을 조합하여 단일 저수지 운영을 위한 모형의 개발 및 적용에 그치고 있으나, 본 연구에서는 퍼지제어기법과 최적화 기법의 하나인 선형 계획법을 사용하여 두 개 저수지의 연계운영 모형을 개발하였는데 의의가 있다고 판단된다.

현재 추가적인 연구를 통해 실제 저수지의 물리적 상황을 좀 더 정확하게 반영할 수 있는 최적운영모형을 구축하고 있으며, 지금까지 개발된 퍼지최적저수지운영기법을 기반으로 연속적인 유황의 변동을 고려하여 방류량을 결정하고, 각 구간별 방류량의 증감 폭을 조절할 수 있는 운영기법을 개발 중에 있다. 이후의 연구를 통해 개발될 모형은 기존의 저수지 운영 기법의 단점을 보완하여 이상홍수 발생 시 저수지 운영자의 의사결정에 도움을 줄 수 있는 정보를 제공하여 댐의 안전성을 높이고, 하류의 홍수피해 저감에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0029851).

참고문헌

- 건설교통부(2004) 댐의 수문학적 안정성 검토 및 치수능력증대 기본계획 수립.
- 고덕구(2011) “이상홍수의 현황과 대응방안”, 국토, 국토연구원, 통권355호, pp. 24-29.
- 고충석, 이병철(1986) “선형계획기법(Linear Programming)에 관한 연구”, 제주대학교 논문집, 제주대학교, 제23집(사회편), pp. 13-27.
- 김진호(2011) 적응 퍼지 제어기법을 이용한 대형댐 운영의 최적화, 석사학위논문, 경희대학교 대학원.

- 심재현, 김지태, 허준행(2004a) “퍼지제어모형을 이용한 다목적댐의 홍수조절모형(I)-단일댐의 운영모형 개발”. 한국방재학회 논문집, 한국방재학회, Vol. 4 No. 1, pp. 33-40.
- 심재현, 김지태, 조원철(2004b) “퍼지제어모형을 이용한 다목적댐의 홍수조절모형(II)-과거홍수사상에 대한 적용”. 한국방재학회 논문집, 한국방재학회, Vol. 4 No. 1, pp. 41-50.
- 이재웅, 최성규(2007a) “Fuzzy DP를 이용한 유역의 저수지 시스템 최적운영(I) - Fuzzy DP 기법 개발”. 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, Vol. 27 No. 18, pp. 65-70.
- 이재웅, 최성규(2007b) “Fuzzy DP를 이용한 유역의 저수지 시스템 최적운영(II) - 다목적댐에 적용”. 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, Vol. 27 No. 18, pp. 71-77.
- 정한우(2005) 홍수시 저수지 운영을 위한 퍼지-타부탐색 모형의 적용, 석사학위논문, 인하대학교 대학원.
- Deep, K., Singh, K.P., Kansal, M.L., and Mohan, C. (2009) “Management of multipurpose multireservoir using fuzzy interactive method”, *Water Resources Management*, Edited by Springer, Netherlands, 2009, pp. 1-17.
- Ganji, A., Khalili, D., Karamouz, M., Ponnambalam, K., and Javan, M. (2008) “A fuzzy stochastic dynamic Nash game analysis of policies for managing water allocation in a reservoir system”, *Water Resources Management*, Edited by Springer, Netherlands, Volume 22, Issue 1, January 2008, pp. 51-66.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Jairaj, P.G. and Vedula, S. (2000) “Multireservoir system optimization using fuzzy mathematical programming”, *Water Resources Management*, Edited by Springer, Netherlands, Volume 14, Issue 6, December 2000, pp. 457-472.
- Karaboga, D., Bagis, A., and Haktanir, T. (2008) “Controlling spillway gates of dams by using fuzzy logic controller with optimum rule number”, *Applied Soft Computing Journal*, Volume 8, Issue 1, January 2008, pp. 232-238.
- Mamdani, E.H. and Assilian, S. (1975) An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-13.
- Mehta, R. and Jain, S.K. (2009) “Optimal operation of a multi-purpose reservoir using neuro-fuzzy technique”, *Water Resources Management*, Edited by Springer, Netherlands, Vol. 23, Issue 3, pp. 509-529.
- Panigrahi, D.P. and Mujumdar, P.P. (2000) “Reservoir operation modelling with fuzzy logic”, *Water Resources Management*, Edited by Springer, Netherlands, Volume 14, Issue 2, April 2000, pp. 89-109.
- Pinthong, P., Gupta, A.D., Babel, M.S., and Weesakul, S. (2009) “Improved reservoir operation using hybrid genetic algorithm and neurofuzzy computing”, *Water Resources Management*, Edited by Springer, Netherlands, Vol. 23, Issue 4, 2009, pp. 697-720.
- Zadeh, L.A. (1965) “Fuzzy sets”, *Information and Control*, Vol. 8, Issue 3, pp. 338-353.

(접수일: 2012.4.19/심사일: 2012.5.23/심사완료일: 2012.6.11.)