

# 이상홍수를 고려한 퍼지 저수지 운영 모형 개발

## Development of Fuzzy Reservoir Optimization Model Considering Abnormal Flood

최창원\*, 권용익\*\*, 이재응\*\*\*  
Changwon Choi, Yongik Kwon, Jaeung Yi

### 요 지

지구 온난화로 인한 이상기후 현상이 지속적으로 발생됨에 따라 풍수해의 저감과 수자원의 효율적인 활용에 대한 관심이 높아지고 있다. 국내의 경우 주요지점의 상류에 댐을 건설하고 댐 상류의 저류공간을 이용하여 홍수를 저감하고 수자원을 확보하는 것이 가장 일반적으로 사용되고 있는 홍수대응과 수자원 활용 방안이다. 수자원 문제를 해결하기 위한 다양한 기법들이 연구되고 적용되고 있지만, 수자원 문제는 불확실성과 애매모호함을 내포하고 있어 풍수해 피해 저감과 한정된 수자원의 효율적인 활용을 어렵게 하고 있다. 본 연구에서는 수자원 문제에 내포되어 있는 불확실성과 애매모호함을 해결하기 위해, 인간의 사고과정과 유사한 추론과정을 통해 애매모호함을 처리하는 데 강점을 가진 퍼지추론기법을 적용하여 저수지 퍼지최적운영모형을 개발하는 것을 목적으로 하였다. 또한 기후변화를 고려하기 위해, 일반적으로 발생하고 있는 홍수뿐만 아니라 이상홍수 발생의 경우도 고려하여 저수지 운영모형을 개발하였다. 저수지 운영모형 개발을 위해 다음과 같은 과정을 통해 퍼지최적운영모형을 개발하였다. 우선 선형계획법을 사용해 일반적인 홍수와 이상홍수 유입시 저수지 최적연계운전을 실시하여 최적운영규칙을 추출하였다. 그리고, 최적운영을 통해 추출된 각각의 운영규칙을 퍼지기법을 도입하여 퍼지운영규칙으로 정리하였다. 마지막으로, 정리된 각각의 퍼지운영규칙을 조합하여 이상홍수를 고려한 저수지 운영규칙을 구성하였다. 본 연구에서는 낙동강 상류에 위치한 다목적댐인 안동댐과 임하댐 유역을 시험유역으로 선정하여 모형을 개발하였고, 일반적인 홍수로는 안동댐과 임하댐에 각각 100년 빈도의 홍수가 유입되는 것을 가정하였으며, 이상홍수로는 각의 댐에 극한홍수(PMF)가 유입되는 것으로 설정하였다. 개발된 저수지 운영모형을 통해 시험유역의 저수지 운영을 모의한 결과 각 댐의 유입량자료와 저수지 저류량 자료, 하류지점의 유량자료만을 사용하여 간편하고 신속하게 저수지 운영을 수행 할 수 있었다.

**핵심용어 : 퍼지추론기법, 최적운영, 저수지 연계운영, PMF**

### 1. 서론

최근 기후변화의 영향으로 이상홍수와 이상가뭄과 같은 이상기후 현상이 지속적으로 발생하고 있으며 이에 따라 수자원의 효율적인 활용과 풍수해의 저감에 대한 관심이 높아지고 있다. 국내에서는 각 수계별로 댐을 건설하고 댐의 저류능력을 이용하여 홍수기에는 홍수량을 저감하고 평수기에는 저류된 수자원을 활용하는 방안이 대표적인 홍수저감 및 수자원 이용 방안으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 낙동강 상류에 위치한 안동-임하댐 유역에서 치수능력 증대사업을 통해 안동댐과 임하댐의 홍수배제능력이 향상된 조건에서 100년 빈도 홍수와 PMF에 해당하는 이상홍수가 발생하였을 경우 각 댐으로 유입되는 유입량 자료를 이용하여 안동-임하댐의 최적 연계운전을 실

\* 정회원 · 아주대학교 건설교통공학과 박사과정 · E-mail : itsme99@ajou.ac.kr  
\*\* 정회원 · 현대산업개발 토목설계팀 대리 · 공학석사 · E-mail : yikkwon@hyundai-dvp.com  
\*\*\* 정회원 · 아주대학교 환경건설교통공학부 교수 · 공학박사 · E-mail : jeyi@ajou.ac.kr

시하고, 각각의 최적 운영결과를 추출한 후 두 개의 운영결과를 조합하여 이상홍수를 고려한 저수지 최적운영 규칙을 정리하였다. 정리된 저수지 운영규칙은 각 저수지의 특성과 유입유량의 특성을 고려한 퍼지변수를 이용하여 퍼지운영 규칙으로 변환하여 이후 PMF와 같은 이상홍수가 발생 시 두 개 이상의 다목적 댐을 최적 연계 운영하여 저수지의 안전도 향상을 위한 저수지 최적 퍼지 연계운영 기법을 개발 하는 것을 목표로 하였다.

## 2. 적용 이론

본 연구에서는 제한된 자원을 어떻게 합리적으로 배분할 것인가를 결정하기 위해 최적화 기법의 하나인 선형계획법(Linear Programming)을 사용하여 저수지 최적운영을 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 댐의 물리적 특성 값을 제약조건으로 두 개의 저수지를 연계 운영하였다.

저수지 제어에 사용한 퍼지제어기법은 현실에서의 수자원 문제와 같이 불확실성이 산재해 있고, 애매모호한 문제를 다루기에 적합한 이론이다. 어느 집합의 소속도를 나타내는데 있어서 임의의 원소가 특정 집합에 완전하게 포함될 경우의 membership을 1이라 하고 완전하게 벗어나서 포함되지 않을 경우의 membership을 0이라 할 경우, 일반적인 집합의 소속도는 0과 1 두 가지의 경우로만 구분되어지게 되지만, 퍼지집합에서는 0과 1 사이의 소속도를 가질 수 있어 애매모호함이 내재된 자연현상을 다루는데 용이하다. 퍼지추론은 일반적인 입·출력변수를 퍼지변수로 변환하는 fuzzification, 전문가적인 지식에 기초하여 퍼지 룰을 만드는 formulation, 다수의 입력변수가 존재할 때 입력값을 취합하는 application, 입력값들의 조합으로부터 결과를 도출하는 implication, 퍼지형태의 최종 결과를 일반적인 결과값으로 변환하는 defuzzification의 다섯 과정으로 구성된다.

## 3. 시험유역 적용

본 연구에서는 저수지 연계운영을 위한 대상유역으로 낙동강 상류에 위치한 안동댐과 임하댐 유역을 선정하였고, 두 댐 하류에 위치한 안동시를 댐 운영에서의 주요 조절지점으로 하여 연계운영을 실시하였다. 안동댐과 임하댐은 낙동강의 상류에 위치한 안동시로부터 각각 5.8km, 17.4km 상류에 위치하고 있으며 임하댐 하류로부터 길안천이 유입된다(그림 1).

### 3.1 최적 연계운영

최적 연계운영을 위한 모형을 구성하기 위해 그림 2의 모식도와 같이 시험유역을 단순화시켜 모형을 구성하였다. 안동시의 상류에 안동댐과 임하댐이 위치하며 임하댐과 안동시 사이에는 반변천의 지류인 길안천이 유입되고 있다. 저수지 운영을 위한 조절지점으로는 안동시 지점을 선정하였다. 최적화 모형은 안동댐과 임하댐에서 방류한 방류량과 길안천 유입량을 하도추적하여 산정한 안동시지점 홍수량의 최대값을 최소화하는 것을 목적함수로 하여 10분 간격으로 운영하였다. 모형의 제약조건은 각 댐의 물리적 제약조건인 저류량의 최대·최소값, 최대·최소 방류량과 운영에 따른 제약조건으로 방류량의 변화율 등을 고려하여 구성하였다. 저류량의 하한은 저수위로 하고, 상한은 댐의 운영 결과를 검토하여 각 저수지의 저류능력을 초과할 경우 계획홍수위로부터 댐의 여유고를 고려한 최대수위에 해당하는 저류량의 범위까지 변경하며 운영하였다. 각 댐 방류량의 최소값은 계획공급량으로 하고, 최대값은 치수능력 증대사업을 통해 현재 설치중인 각 댐의 비상

여수로 용량을 포함한 용량의 범위로 제한하였다. 방류량 변화율은 최대 방류량의 10%에 해당되는 방류량 이하의 범위에서 변화하도록 하였다.

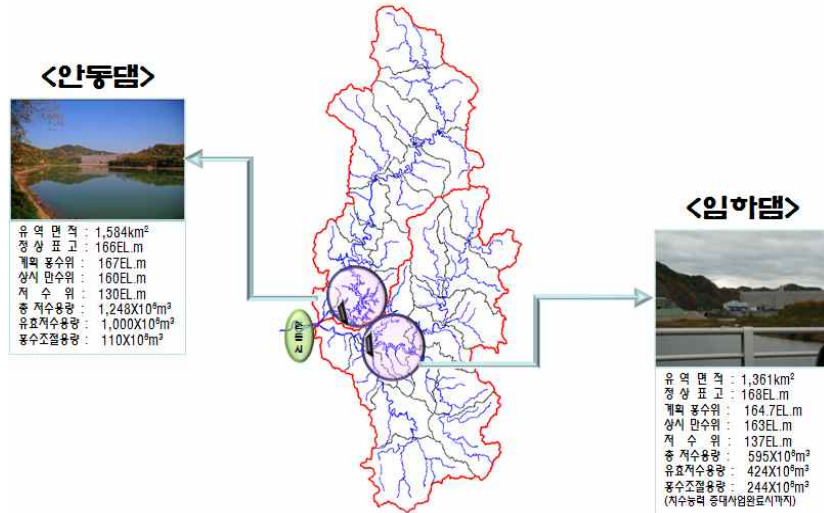


그림 1. 안동-임하댐 유역도

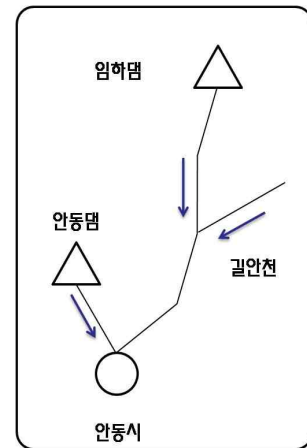
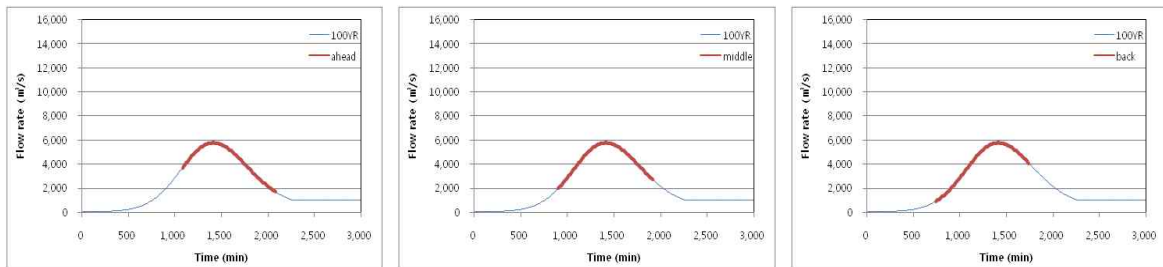


그림 2. 모식도

최적화 모형의 입력값으로는 일반홍수로는 각 댐과 길안천의 100년 빈도 홍수량을 사용하였고, 이상홍수 상황을 고려한 시나리오에서는 각 댐의 PMF와 길안천의 200년 빈도 홍수량을 사용하였다. 각각의 홍수량은 임계시간 50시간(300구간, 3,000 min)을 갖는 홍수량을 사용하였으나 최적화의 특성상 전체 자료를 사용하여 최적저수지 운영을 실시할 경우, 유입량의 크기와 변화 특성, 저수지의 전체 운영 상황 등 모든 조건들을 통한 최적운영을 실시하게 된다. 이는 실제 운영 조건과는 상이한 부분이 발생 할 것으로 판단하여 유입량의 전체 기간 중 첨두부를 포함한 100개의 자료만을 입력자료로 사용하였다. 또한, 최적화 모형의 운영에서 각 홍수유입 시 발생할 수 있는 다양한 상황을 모의하기 위해 다음의 표와 같이 각 댐의 저류량 초기값(각 3 개)과 유입량자료(각 3 개)를 조합하여 전체 81 개의 모형을 구성하여 운영하였다. 각 저수지의 유입유량의 형태를 나타내기 위해서 첨두유량이 전체유입량의 어느 부분에 위치하는가에 따라 전·중·후반부(A : Ahead, M : Middle, B : Behind)로 구분하였고, 저수지의 초기 저류량을 나타내기 위해서는 각 저수지의 저류량의 크기에 따라 VB(Very Big), BI(Big), MB(Medium Big)의 세 가지로 구분하였고, 일반홍수와 이상홍수 두 경우에 대해 각각 최적운영을 실시하였다.

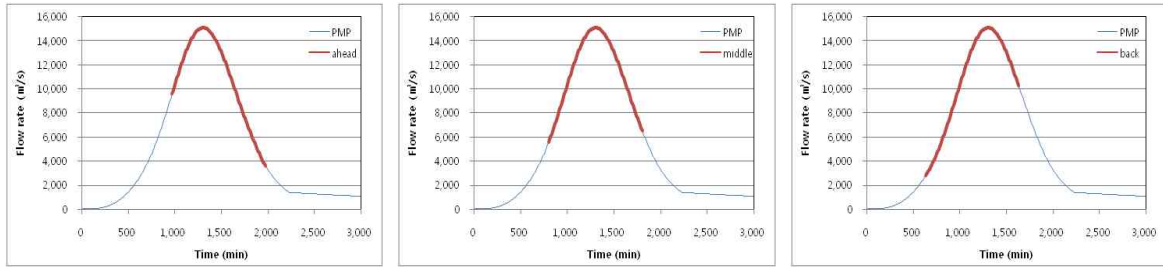


(a) 첨두유량 전반기 유입

(b) 첨두유량 중반기 유입

(c) 첨두유량 후반기 유입

그림 3. 첨두유량 위치에 따른 100년 빈도 홍수량



(a) 침투유량 전반부 유입                      (b) 침투유량 중반부 유입                      (c) 침투유량 후반부 유입

그림 4. 침투유량 위치에 따른 PMF 홍수량

표 1. 최적화 모형의 입력값 조합

구분	유입량		초기 저류량	
	안동댐	임하댐	안동댐	임하댐
고려 조건	<Ahead>	<Ahead>	<5 MB>	<5 MB>
	<Middle>	<Middle>	< 6 BI >	< 6 BI >
	<Behind>	<Behind>	<7 VB>	<7 VB>
경우의 수	3	3	3	3

### 3.2 퍼지 기법의 적용

본 연구에서 각 변수를 퍼지화하기 위해 각 댐의 제원과 유입량 및 유출량자료와 안동시지점에서의 유량 자료의 특성을 고려하여 퍼지 소속함수를 구성하였다. 먼저, 유입량의 변화를 제외한 모든 변수들의 값을 7개의 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 멤버쉽 함수를 구성하였다. 각 저수지 유입량과 방류량, 그리고 안동시지점의 유량의 멤버쉽 함수의 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(표 2).

각 변수에 따른 퍼지 소속함수를 이용하여 일반홍수와 이상홍수 발생조건에서 저수지 최적연계운영 결과자료로부터 추출된 최적운영 규칙을 퍼지 규칙으로 재구성하였다. 일반홍수와 이상홍수 발생조건에서 각각 57,228개의 규칙이 존재하지만 해당되는 경우가 없는 경우를 제외하고, 입력조건이 동일한 경우 결과값을 평균하여 정리하여 일반홍수와 이상홍수 조건에서 각각 226개와 46개의 퍼지 운영규칙을 얻을 수 있었다. 이후 기본적인 운영규칙을 추가하여 일반홍수와 이상홍수를 모두 고려한 퍼지 운영규칙을 구성하였다.

표 2. 각 변수에 대한 멤버십 함수

변수	최소값	최대값	MF의 수	MF의 종류	MF의 간격
저류량	저수위의 저류량	홍수위의 저류량	7	삼각형 MF (triangular MF)	기본 등간격 · MB : 월류부 수위의 저류량 · BI : 상시만수위(홍수기제한수위)의 저류량 · VB : 계획 홍수위의 저류량
유입량	0	PMF의 첨두유량	7	삼각형 MF (triangular MF)	등간격
유입량의 변화	0	1	2	사다리꼴 MF (trapezoidal MF)	등간격 (감소 : 0, 그 외의 경우 : 1)
안동시 유량	0	PMF 발생시 최대 유량	7	삼각형 MF (triangular MF)	등간격
방류량	0	방류량 최대값*	7	삼각형 MF (triangular MF)	등간격

\* : 치수능력 증대사업을 통해 산정된 비상여수로 설계 시의 최대 방류량

### 3.3 시험유역 적용 결과

이상홍수 발생 시 저수지 운영기법을 개발하기 위해 본 연구에서는 최적화 기법인 선형계획법과 퍼지제어기법을 사용하였다. 저수지 운영 최적화 운영에서는 이상홍수발생만을 고려하여 모형을 구성하였고, 최적 운영결과에 퍼지제어기법을 적용하여 약 300개의 퍼지규칙으로 구성된 퍼지 최적저수지운영모형을 개발할 수 있었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 안동·임하댐 상류에 PMF에 해당하는 이상홍수뿐만 아니라 100년빈도 홍수에 해당하는 일반홍수의 발생을 가정하여 댐의 하류에 위치한 안동시 지점의 유출량을 최소화하는 것을 목적으로 하여 최적화 기법인 선형계획법과 퍼지제어기법을 적용하여 퍼지최적저수지운영기법을 개발하였다. 일반홍수와 이상홍수를 모두 고려하기 위해 일반홍수와 이상홍수 조건에서 각각 저수지 최적운영을 실시하고 그 결과를 바탕으로 퍼지운영규칙을 작성하였고, 이상홍수 발생 시 홍수저감능력을 최대화하기 위해 저수지 저류 능력을 초과할 경우 계획홍수위 이상의 수위에서 여유고를 고려한 최대수위까지 저류하는 것을 고려하여 저수지 연계운영을 실시하였다. 그 결과 약 300개의 퍼지규칙으로 구성된 퍼지최적저수지운영모형을 개발할 수 있었다. 개발된 저수지 운영모형을 통해 시험유역의 저수지 운영을 모의한 결과 각 댐의 유입량자료와 저수지 저류량 자료, 하류지점의 유량자료만을 사용하여 간편하고 신속하게 저수지 운영을 수행 할 수 있었다. 본 연구를 통해 개발된 이상홍수를 고려한 퍼지최적저수지운영모형을 통해 이상홍수 발생 시 댐의 안전성을 높이고 하류의 홍수피해를 최소화한 저수지 운영이 가능할 것으로 기대된다.

## 5. 감사의 글

본 연구는 건설교통부 한국건설교통기술평가원의 이상기후대비시설기준강화 연구단에 의해 수행되는 2005 건설기술기반구축사업(05-기반구축-D03-01)에 의해 지원되었습니다.