

# 저수지군 운영을 위한 퍼지 최적화 운영 모형 개발

## Development of Multi-Reservoir Fuzzy Optimization Operation Model

최창원\* / 이재응\*\*

Choi, Changwon / Yi, Jaeung

### 요 지

지구 온난화의 영향으로 최근 이상홍수에 의한 피해가 증가하고 있다. 국내 다목적댐의 경우 월별 목표수위를 기준으로 하는 저수지 운영틀이 존재하지만 이것은 실제 이상홍수가 발생할 경우 저수지 운영에 도움을 주지 못하는 것이 현실이다. 본 연구에서는 자원배분문제의 최적해를 찾는 데 사용되는 최적화기법의 하나인 선형계획법과 수자원 문제와 같이 불확실성이 산재해있고, 애매모호한 문제를 다루기에 적합한 퍼지제어 기법을 적용하여 이상홍수 발생 시 두 개 이상의 다목적댐 군을 연계운영하기 위한 퍼지 최적 운영 기법을 개발하는 것을 목표로 하였다. 시험유역으로는 낙동강 상류에 위치한 안동댐과 임하댐 유역을 대상으로 PMF 발생 시 댐의 안전성을 높이고 안동시 지점에서의 최대홍수량을 최소화하기 위한 퍼지최적운영기법을 개발하였다.

**핵심용어 :** 퍼지추론기법, 최적운영, 다중 저수지 운영, PMF

### 1. 서론

국내의 경우 지구 온난화 현상의 영향으로 태풍이나 국지성 집중호우 등으로 인한 피해가 빈번하게 발생하고 있다. 특히 2002년 발생한 태풍 루사의 경우 강릉지역에 PMP 이상의 집중호우를 발생시켜 동막댐, 장현댐 등의 저수지가 붕괴되어 막대한 피해를 초래하였다. 현재 우리나라 다목적댐의 경우 월별 목표수위를 기준으로 하는 저수지 운영틀이 존재하지만 이것은 거시적 관점에서의 저수지 운영 목표일뿐, 실제 이상홍수가 발생할 경우 저수지 운영에 도움을 주지 못하고 있는 것이 현실이다. 최근 들어 다목적댐에 대하여 PMF를 소통시킬 수 있는 여수로 설계가 이루어지고 있지만, 실제 PMF에 근접하는 홍수가 도달했을 때의 저수지 운영방안에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 또한 저수지의 홍수 대응 능력을 향상시킬 수 있는 두 개 이상의 저수지군에 대한 연계운영을 위한 운영은 고려되지 못하고 있다.

현재 홍수 발생 시 적용 가능한 다양한 저수지 운영기법에 대한 연구와 여러 개의 저수지를 연계운영하기 위한 연구가 진행되고 있다. 심순보 등(1998)은 유역 내의 홍수조절효과를 극대화하는 동시에 홍수피해를 최소화하기 위해 최적화기법인 동적계획법 중 증분동적계획법(Incremental Dynamic Programming)을 사용하여 저수지군 운영모형을 개발하여 한강의 소양강댐과 충주댐을 연계 운영하였으며, 김윤태(2004)는 퍼지제어 기법을 이용하여 한강유역의 댐 군(화천댐, 소양강댐, 충주댐)에 대한 연계운영 모형을 확립하고 한강의 과거 홍수사상에 대해 모의하여 기존의 댐 운영방식 중의 하나인 Rigid ROM 모형과 비교함으로써 모형의 적용성을 검증하는 등 홍수기 저수지 군 운영을 위한 연구를 진행하였다. 손덕환(2004)은 섬진강댐과 주암댐을 대상으로 ANFIS(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)를 이용하여 저수지 유입량을 예측하고, 예측된 댐 유입량을 이용해 HEC-5를 통해 저수지 운영하였다. 지금까지의 연구에서는 두 개 이상의 저수지군에 단일 기법을 적용하거나 하나의 저수지에 두 가지 이상의 기법을 조합하여 적용하는 연구가 주로 진행되어왔다. 본 연구에서는 두 개의 다목적댐에 퍼지제어기법과 최적화기법인 선형계획법을 접목한 운영기법을 적용하여 낙동강 상류에 위치한 안동댐과 임하댐의 운영에 적용하였다.

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

\*\* 정회원 · 아주대학교 환경건설교통공학부 교수 · 공학박사 · E-mail : jeyi@ajou.ac.kr

## 2. 기본 이론

홍수기 저수지 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 강우 사상과는 다른 양상을 가질 것으로 예상되어 기존의 저수지 운영기법과는 다른, 좀 더 신뢰성 있고 정밀한 운영방법을 통해서 운영되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 이상홍수 발생 시 저수지 최적 운영 결과로부터 저수지 최적 운영규칙을 추출하여 인간의 사고체계와 유사한 형태의 추론을 수행하는 퍼지추론 기법에 적용하여 저수지 퍼지 최적 운영 기법을 개발하였다.

본 연구에서 사용한 최적화 기법의 하나인 선형계획법(Linear Programming)은 제한된 자원을 어떻게 합리적으로 배분할 것인가를 결정하기 위한 수리적 계획법(Mathematical Programming)이다. 선형계획법이 갖는 특징은 선형함수로 표시되는 목적함수와 선형부등식으로 표현되는 제약조건을 갖고 자원배분문제(Resource Allocation)의 최적해를 찾는 데 있다(고충석, 이병철; 1986). 저수지 최적 연계운영은 시·공간적으로 불균형하게 존재하는 두 개 이상의 수자원을 균형 있게 이용하기 위한 기법으로 본 연구에서는 저수지 하류 지점에서의 최대홍수량을 최소화 하는 것을 목적함수로 하고, 각 댐의 물리적 특성 값을 제약조건으로 두 개의 저수지를 연계 운영하였다.

저수지 제어에 사용한 퍼지제어기법은 현실에서의 수자원 문제와 같이 불확실성이 산재하여있고, 애매모호한 문제를 다루기에 적합한 학문으로 Zadeh에 의해서 처음 소개(1965)되었고, Mamdani가 퍼지 알고리즘과 복잡한 시스템의 언어모델링을 이용하여 제어에 응용(1975)하면서 퍼지제어에 본격적으로 이용되기 시작하였다. 퍼지추론은 일반적인 입·출력변수를 퍼지변수로 변환 하는 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 이상홍수 발생 저수지 최적 연계운영기법을 개발하기 위해 안동댐과 임하댐이 위치한 낙동강 상류유역을 대상으로 연구를 진행하였다. 안동댐과 임하댐은 낙동강의 상류에 위치한 안동시로부터 각각 5.8km, 17.4km 상류에 위치하고 있으며 임하댐 하류로부터 길안천이 유입된다(그림 1).

### 3.1 최적 연계운영을 위한 모형 구성

시험 유역은 다음 모식도와 같이 안동시의 상류에 안동댐과 임하댐이 위치하며 임하댐과 안동시 사이에는 반변천의 지류인 길안천이 유입되고 있다. 저수지 운영을 위한 조절지점(CP: control point)으로는 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 4배에 달하여 최적화 모형에서는 하도추적을 위한 하도의 구간을 안동시-안동댐 구간은 하나의 구간으로 하고, 안동시-임하댐 구간은 네 개의 구간으로 나누었다. 하도추적에는 Muskingum 방법을 사용하였다.

최적화 모형은 안동시지점의 홍수량의 최대값을 최소화하는 것을 목적함수로 하여 10분 간격으로 운영하였다. 안동시지점의 홍수량은 안동댐과 임하댐으로부터 방류되는 유량을 하도추적하고 길안천의 지류유입량을 고려하여 산정하였다. 각 댐의 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. 방류량 변화율의 상한은 이전시간 방류량의 10%로 제한하였다.

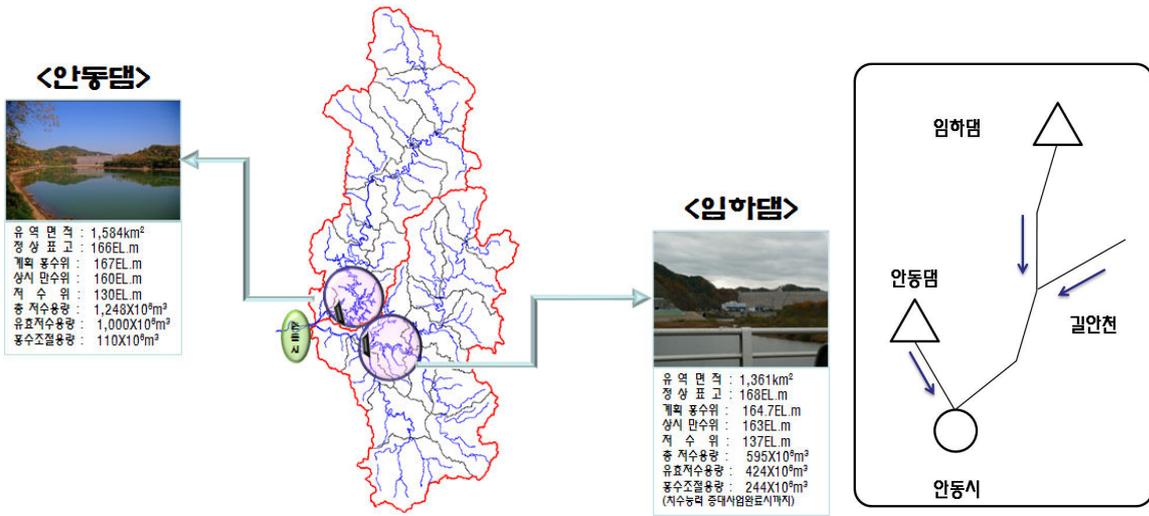


그림 1. 안동-임하댐 유역도

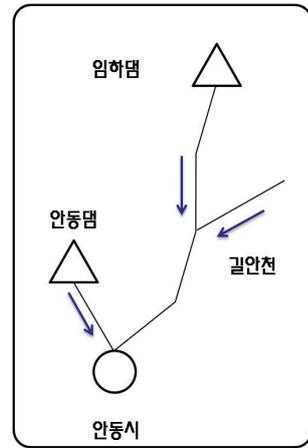


그림 2. 모식도

최적화 모형을 구성하기 위해서 각 댐의 상류에 임계지속시간 PMP 발생 상황에 따른 PMF 값을 사용하였다. 각 저수지의 유입량은 임계지속시간 PMP로부터 산정된 PMF를 시작시점으로부터 50시간(300구간, 3,000min)까지의 댐 유입량 자료를 사용하였다. 각 저수지의 유입량으로 사용된 자료는 전체 50시간의 지속기간을 갖는 PMF 자료(300구간 자료)를 사용하였으나 전체기간의 자료를 모두 사용할 경우 유입량의 크기와 지속시간 침투 발생시간 등의 특성을 미리 알게 되어 침투 유입량 발생시간까지 사전방류가 가능하고, 침투 유입량 발생 이후 유입량 감소에 따라 저류에 중점을 둔 운영을 하게 된다. 따라서 실제 운영과는 다른 운영을 하게 되므로 침투값을 포함하는 전체 길이의 1/3의 자료(100구간)만을 입력자료로 사용하고, 침투값의 위치를 전·중·후반부에 위치시켜 다양한 형태의 홍수가 유입될 경우에 대해 모의 하였다.

### 3.2 최적화 모형 운영과 결과

최적화 모형의 운영에서 저수지로 이상홍수 유입 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 침투유량이 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 구분하였다.

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

최적화 모형 운영 결과 전체 81 개의 case 중 56 개의 case는 최적운영을 통해 가능해를 얻을 수 있었지만 25 개의 case에 대해서는 불가능해에 도달했다. 불가능해는 저수지 초기저류량이 큰 상태에서 유입량의 침투값이 홍수의 전반부에 발생할 경우, 각 댐의 방류능력으로 댐의 최대수위를 초과하지 않으면서 방류가 불가능하기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 불가능해에 도달한 25 개 case는 배제하고 56 개의 case만을 이용하여 저수지 최적 운영률을 추출하였다.

### 3.3 퍼지 기법의 적용

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

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 침투유량	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

### 3.4 퍼지 규칙 구성 및 종합

각 변수에 따른 퍼지 멤버십 함수를 이용하여 각각의 경우 저수지 최적연계운영 결과자료로부터 추출된 최적운영 규칙으로부터 퍼지 규칙을 구성하였다. 이후 저수지의 초기저류량과 유입유량의 형태의 조합에 의해 추출된 56개 set(feasible solution으로부터 추출한 규칙)의 퍼지 규칙을 취합하여 다양한 이상홍수 발생상황을 고려한 최종 퍼지규칙을 구성하였다. 각각의 set은 약 100개의 규칙으로 구성되어 약 5,600개의 규칙이 생성되었으나, 이중 입력변수의 조건이 같은 규칙의 출력변수 값을 평균하여 하나의 규칙으로 정리하고, 선형계획법의 운영결과 마지막 단계에서 각 저수지의 방류량이 “0”이 되는 조건들을 정리하였다. 그 결과 최종 구성된 퍼지 규칙은 561개의 상황에 대한 운영 규칙으로 구성되었다.

### 3.5 시험유역 적용 결과

이상홍수 발생 시 저수지 운영기법을 개발하기 위해 본 연구에서는 최적화 기법인 선형계획법과 퍼지제어기법을 사용하였다. 저수지 운영 최적화 운영에서는 이상홍수발생만을 고려하여 저수지의 저류량이 어느 정도 많은 경우(Medium Big) 이상의 경우에 대해서만 모형을 구성하였고, 운영결과 전체 81가지 모형 중 가능해에 도달한 56 개의 모형을 이용하여 저수지 최적 운영물을 추출하였다. 추출된 최적 운영물을 퍼지제어 기법에 적용하여 561 개의 퍼지룰로 구성된 퍼지최적저수지운영기법을 개발하였다.

### 4. 결론

본 연구에서는 안동·임하댐 상류에 PMF에 해당하는 이상홍수 발생 시 댐의 하류에 위치한 안동시 지점의 유출량을 최소화하는 것을 목적으로 하여 최적화 기법인 선형계획법과 퍼지제어기법을 적용하여 퍼지최적저수지운영기법을 개발을 목표로 하였다. 개발 중인 퍼지최적저수지운영기법의 적용성을 높이기 위해서는 다음과 같은 부분이 추가적으로 고려되어야 한다. 현재 모형의 구축과정에서는 이상홍수 시 저수지 운영물을 추출하기 위해 고려한 81개의 모형 중 불가능해에 도달한 25 개 경우에 대해서는 고려하지 못하였으나 실제 이상홍수 발생 시 저수지 운영을 위해서는 최적운영의 제약 조건 등을 수정하여 고려한 전체 모형에서 최적운영이 가능하도록 조절해야 할 것으로 판단된다. 또, 기존의 홍수기 저수지 운영기법과 본 연구를 통해서 개발된 이상홍수 발생 시 저수지 운영기법을 연동하여 적용할 수 있는 방안이 마련되어야 한다. 이와 같은 부분을 추가적으로 고려한 후 완성된 저수지운영기법의 적용성을 평가하기 위해서 필요한 과거 발생했던 홍수사상에 대한 실제 운영 결과와 기존에 사용되던 운영기법과의 비교 및 검토를 계획 중에 있다. 본 연구 종료 후 개발된 퍼지최적저수지운영기법을 통해 이상홍수 발생 시 댐의 안전성을 높이고, 하류의 홍수피해를 최소화할 수 있을 것으로 기대된다.

### 5. 감사의 글

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

### 참 고 문 헌

1. 고충석, 이병철(1986). 선형계획기법에 관한 연구, Cheju University Journal Humanities-Social Sciences, Vol. 16, No. 1, p. 271.
2. 김운태(2004). 퍼지 제어기법을 이용한 한강유역 댐 연계운영방안 연구, 박사학위논문, 홍익대학교.
3. 손덕환(2004). 인공지능을 이용한 댐운영의 최적화, 석사학위논문, 전남대학교.
4. 심순보, 김선구, 김주훈(1998). CSUDP를 이용한 저수지군의 홍수조절 운영모형, 건설기술논문집, Vol. 17, No. 1, pp.127-138.
5. 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.
6. Zadeh L.A.(1965). Fuzzy Sets, Information and Control, Vol. 8, pp.338-353.