

타부탐색기법에 의한 홍수시 저수지 운영에 관한 연구

Reservoir Operation by Tabu Search Method during Flood

정 한 우* / 최 승 안** / 김 형 수*** / 심 명 필****

Jeong, Han Woo / Choi, Seung An / Kim, Hung Soo / Shim, Myung Phil

Abstract

This study applied the fuzzy logic control for the construction of the reservoir operation model which can consider uncertainty of the predicted inflow in determining reservoir release during flood period. The control rule is usually constructed based on the opinion of experts which is a general technique. To improve the drawback of general technique, this study constructed the Fuzzy-Tabu search model automatically established by the fuzzy rule using Tabu search which is a global optimization technique. As the results, the peak release is decreased and the flood control efficiency is improved. The total release is also decreased and this represents the benefit in water use. Consequently, it is confirmed that the effect of flood control can be increased through the constructed model. It also shows that the available water resources after the flood is more increased. So, the proposed Fuzzy-Tabu search model could be better than the actual reservoir operation methodology in the aspect of water use.

keywords : fuzzy logic control, reservoir operation, Tabu search, flood control, water use

요 지

본 연구에서는 퍼지논리제어의 적용을 통해 홍수시 저수지의 방류량을 결정하는데 있어, 예측유입량 자료에 내재된 불확실성을 고려할 수 있는 저수지 운영 모형을 구성하고자 하였다. 제어규칙은 전문가들의 의견을 반영해 규칙 기반을 설정하는데 이러한 일반적인 방법의 단점을 보완하고자 전역 최적화 기법인 타부탐색을 이용하여 제어규칙을 자동적으로 설정해 퍼지-타부탐색 모형을 구성하였다. 모형의 적용 결과, 첨두방류량이 감소되어 홍수조절을 개선되었으며, 총 방류량도 감소하는 것으로 나타나 결과적으로 치수효과가 증대될 수 있음을 확인하였다. 또한 홍수 후에 가용할 수 있는 수자원의 양이 증가되어 실제운영방법보다 이수적 차원에서 향상된 결과를 나타내었다.

핵심용어 : 퍼지논리제어, 저수지운영, 타부탐색, 홍수조절, 이수

-
- * 삼안건설기술공사 수자원부 사원
Staff, Water Resources Dept. Sam-an Engineering Consultants Co., Ltd., Gyeonggi-Do, 427-707, Korea
(e-mail: gksdn77@naver.com)
 - ** 인하대학교 환경토목공학부 박사과정
Doctorate Candidate, Dept. of Civ. and Envir. Engrg., Inha Univ., Incheon 402-751, Korea
(e-mail: sachoi@inha.ac.kr)
 - *** 인하대학교 환경토목공학부 부교수
Assoc. Prof., Dept. of Civ. and Envir. Engrg., Inha Univ., Incheon 402-751, Korea
(e-mail: sookim@inha.ac.kr)
 - **** 인하대학교 환경토목공학부 교수
Prof., Dept. of Civ. and Envir. Engrg., Inha Univ., Incheon 402-751, Korea
(e-mail: shim@inha.ac.kr)

1. 서론

최근 산업화와 도시화에 따른 화석연료 사용의 급증은 지구 온난화를 유발하고 기후변화를 초래하고 있다. 이와 더불어 엘니뇨와 라니냐 현상은 이상기후의 원인이 되고 있는데, 특히 우리나라도 최근 들어 과거 최고치를 경신하는 집중호우들로 대규모 홍수피해가 발생하고 있다. 이러한 홍수피해를 줄이기 위한 대책으로는 크게 구조적 대책과 비구조적 대책으로 나뉘는데, 대표적인 구조적 대책으로 수계 내 다목적 댐 건설이 주로 고려되어 왔었고, 저수지 운영을 통한 홍수조절은 비구조적인 대책에 해당한다고 할 수 있을 것이다.

일반적으로 홍수시 저수지 운영은 강우발생을 예측하고, 강우-유출모형으로 유입량을 예측한 다음, 다목적댐 규정을 포함한 제약조건을 만족하는 방류량에 대해 하도추적을 수행하여 하류의 홍수피해를 최소로 하는 최적의 방류량을 결정하는 일련의 절차에 의해 이루어진다. 홍수시에는 수시로 변하는 수문자료들을 실시간으로 입력받아 매시간 입력되는 관측치와 새롭게 수정되는 예측치로부터 최적의 방류량을 결정하여야 한다(심명필 등, 1990). 하지만 강우 및 강우-유출모형 등의 불확실성으로 인하여 최적의 방류량을 결정하는데 어려움이 많아 대부분의 저수지가 운영자의 주관적 판단에 따라 운영되고 있는 것이 현실이다.

국내에서는 한강수계 댐군의 연계운영 방안을 개발하기 위하여, 이길성과 정동국(1985)이 Spill Rule Curve, Rigid ROM 및 Linear Decision Rule(LDR)에 의한 방안을 대상으로 모의기법을 적용한 바 있다. 오영민과 이길성(1986)은 소양강댐 및 충주댐의 실시간 홍수조절 모형을 개발하기 위하여 Min-Max DP(Dynamic Programming)를 사용하였으며, 심명필 등(1990)은 홍수기 실시간 저수지 운영을 위해 여러 가지 제약조건들을 고려한 모형을 개발하였으며, 이재형 et al.(1992)은 Incremental DP를 이용하여 홍수시 댐군의 연계운영 방안을 제시하였다. 또한, 심명필 등(1996)은 홍수기중의 홍수조절과 이수의 서로 상반된 목적을 다루기 위해 예비방류 방안을 제안하였고, 이한구과 이상호(1998)은 하류 홍수피해 최소화와 댐 안전도 및 상류 홍수피해 최소화의 상충되는 목적을 타협하기 위해 홍수조절을 위한 저수지 최적운영의 방법론을 개발하였다.

Zadeh(1965)로부터 출발한 퍼지이론은 Mamdani(1974)의 스팀엔진제어에 성공적인 적용 이후로 퍼지에 대한 연구가 활발히 전개되어 오고 있다. 국내의 경우, 조원철과 심재현(1992)이 저수지 방류량 제어를 포함한

퍼지이론의 이용 가능분야를 소개한 이래로, 심재현 등(1998)은 우수배제펌프 제어에, 김한섭과 이정규(1998, 2000)은 강우-유출 예측모형과 홍수예보를 위한 통합저류함수모형에, 나창진 등(2002)은 강수예측을 위한 뉴로-퍼지 시스템과 마코프 연쇄를 적용하였고, 김형수 등(2002)은 퍼지 시계열개념을 이용하여 강우예측을 수행하였다. 외국의 연구사례로는 Russell et al.(1996), Campbell(1993), Panigrahi et al.(2000)이 단일목적의 저수지 운영에 Shrestha et al.(1996), Dubrovin et al.(2002)이 다목적 저수지의 운영에 퍼지이론을 적용하여 제어모형을 개발하였다.

타부탐색(Tabu Search)의 경우 Glover(1989, 1990)에 의해 현재의 형태로 제시된 이후, 근래에 들어 그 적용에 관한 연구가 증가하고 있다. Karaboga(1996)는 비용함수를 최소화하도록 자동퍼지규칙을 구성하였으며, Denna et al.(1999)은 반응형 타부탐색을 이용하여 주차제어 퍼지시스템을 구성하였다. Mori et al.(2000)은 발전시스템의 부하를 예측하기 위하여 병렬 타부탐색을 이용하였으며, Bagis(2002)는 타부탐색을 기초로 최적의 퍼지 소속함수를 결정하여 저수지 운영 시스템에 적용하였다.

본 연구에서는 복잡하고 불확실한 입력을 가진 시스템에서 탁월한 성능을 발휘하는 것으로 알려진 퍼지논리제어(fuzzy logic control)의 적용을 통해, 앞선 국내의 여러 연구들에서 미비했던 홍수시 저수지의 방류량 결정시 예측유입량 자료에 내재된 불확실성을 고려할 수 있는 저수지 운영 모형을 구성하고자 하였다. 또한 전문가의 지식을 바탕으로 제어규칙을 설정하는 일반적인 퍼지논리제어 시스템과는 달리 타부탐색 알고리즘을 이용하여 홍수피해증가와 직결되는 방류량을 최소화하도록 제어규칙을 최적화하였고, 이로 인한 홍수후의 이수측면도 살펴보고자 하였다.

2. 퍼지이론과 타부탐색

2.1 퍼지이론

퍼지의 fuzz란 '잔털'이란 의미로 잔털을 통해서 풍경을 보면 흐릿하게 보인다는 뜻에서 '어렵듯하다', '애매하다'라는 의미를 지닌다. 이렇듯 퍼지이론은 현상의 불확실한 상태와 인간의 언어, 의미, 사고, 측정 등에 본질적으로 포함되어 있는 애매모호함을 수학적으로 다룰 수 있도록 제안된 이론으로 고전적인 논리시스템보다 실제 세계의 근사적이고 부정확한 성질을 표현하는데 효과적이라고 알려져 있다(이광형과 오길록, 1991).

퍼지논리제어(fuzzy logic control, FLC)는 간단히 퍼

지제어라고 하며, 이것은 조작자의 시스템 프로세스에 대한 지식과 경험에 기초한 인간판단 등의 애매성을 포함하는 제어 전문지식을 언어적 제어규칙으로 표현하고, 퍼지추론(또는 근사추론)을 이용해서 제어를 실행하는 것이다.

Fig. 1과 같이 퍼지제어는 크게 퍼지화 단계, 지식기반 구축단계, 의사결정 단계, 비퍼지화 단계의 4가지 요소로 구성되어 있다.

퍼지화는 측정된 자료를 퍼지 소속함수로 표현하는 단계이며, 지식기반에는 제어대상에 대한 지식과 제어목적 등이 기술되고 구체적으로 데이터베이스와 제어규칙으로 이루어져 있다. 의사결정 단계에서는 지식기반을 참조하여 퍼지화된 값들을 퍼지추론 과정을 통해 결론적인 퍼지집합을 이끌어낸다. 이렇게 의사결정 단계를 통해 결정된 퍼지값은 제어대상을 제어하기 위한 실제값으로 전환하여야 하는데 이 과정을 비퍼지화라 한다.

2.2 타부탐색

타부탐색은 1960년대 후반 Hansen에 의해 처음 제안된 후, Glover(1989, 1990)에 의해서 현재의 형태로 제시되고 있으며, 일반적으로 조합 최적화문제 해결에 사용되는 메타 휴리스틱(meta-heuristic)이다. 휴리스틱이란 반복적 개선에 기초하여 전역 최적화에 도달하는 방법으로, 타부탐색 이외에도 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing)과 유전자 알고리즘(genetic algorithm) 등이 있다. 시뮬레이티드 어닐링은 금속의 표면처리 과정의 냉각과정에 기초를 두었으며, 유전자 알고리즘은 자연의 진화과정과 유전법칙을 모방하여 해결기법을 제시하고 있는 반면, 타부탐색은 인간의 기억 과정과 유사한 기억구조를 사용하여 문제를 해결한다(김여근 등, 1997). 타부탐색은 일반적으로 다음과 같은 특징이 있다.

- ① 유연한 성질이 있는 기억구조를 사용한다. 이는

시뮬레이티드 어닐링과 같이 기억을 사용하지 않는 방법보다 더 자세하게 역사적 탐색정보와 기준개선을 이용하여 탐색한다.

- ② 기억구조를 사용하여 제약조건(타부상태)과 열망기준(aspiration criteria) 사이에서 자유롭게 탐색한다. 타부상태는 같은 해의 반복을 피하게 하고, 열망기준은 타부상태를 벗어나는데 사용된다.
- ③ 강화(intensification)와 다양화(diversification)전략을 사용한다. 강화전략은 탐색과정을 역사적으로 발견된 좋은 해의 장점을 이용하여 움직이게 하고, 다양화전략은 탐색하지 않은 새로운 영역으로 움직여 다양한 탐색을 수행한다.

일반적인 조합 최적화문제는 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(P) \text{ Minimize } c(x) : x \in X \text{ in } R_n \quad (1)$$

여기서, 목적함수 $c(x)$ 는 선형이거나 비선형일 수 있고, 조건 $x \in X$ 은 이산값으로 x 의 원소를 규정하는 제약식으로 생각할 수 있다. 문제 P 에서 X 는 가능해 공간으로서 해의 자격이 있는 벡터들의 집합이며, R_n 은 n 차원의 실수공간을 나타낸다. 위와 같은 문제를 해결하기 위한 휴리스틱 과정은 임의의 해($x \in X$)에서 다른 해로 이동하는 움직임(moves)의 연속이라고 할 수 있다. 식 (2)와 같이 X 의 부분집합 $X(s)$ 에 대하여 움직임 s 를 $s : X(s) \rightarrow X$ 로 정의하면, $x \in X$ 인 x 에 적용될 수 있는 움직임 $s \in S$ 의 집합은 집합 $S(x)$ 라고 하고, 이것을 '이웃함수(neighborhood function)'라 한다.

$$S(x) = \{s \in S : x \in X(s)\} \quad (2)$$

Glover(1989)가 제안한 단순 타부탐색 과정을 Fig. 2에 나타내었다.

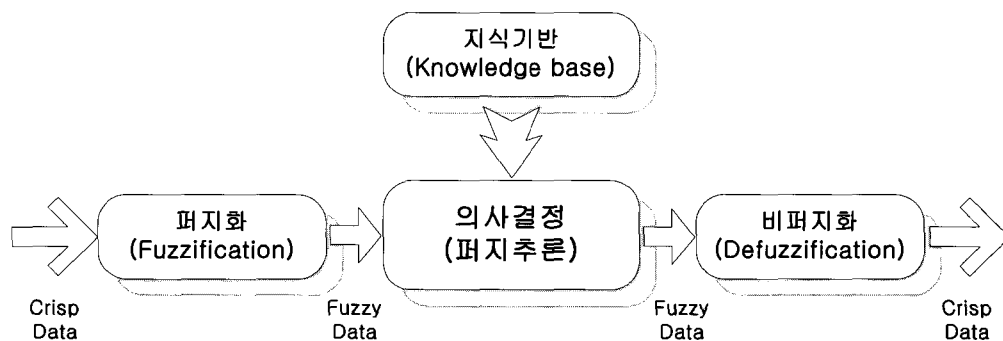


Fig. 1. 퍼지제어기(fuzzy control)의 구조

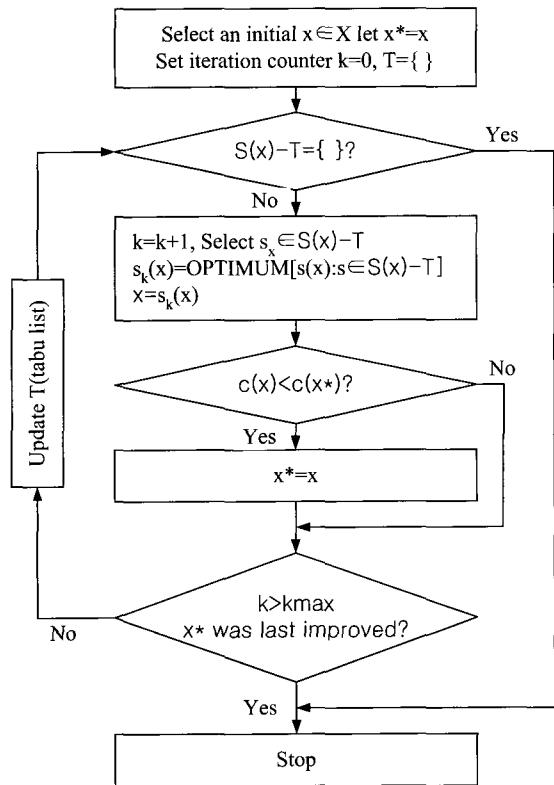


Fig. 2. 단순 타부탐색 절차 (Glover, 1989)

2.3 타부탐색을 이용한 퍼지규칙의 학습

타부탐색을 이용하여 두 개의 입력변수와 한 개의 출력변수를 가지는 제어규칙의 결론부를 결정하는 경우

에, 만약 총 규칙의 개수가 n (입력1의 퍼지분할 개수 \times 입력2의 퍼지분할 개수)이고 출력변수의 퍼지분할 개수가 m 이면 퍼지규칙은 1 ~ m 사이의 숫자로 표현된 n 개의 부호로서 나타낼 수 있으며, 퍼지규칙의 결론부에 대해 가능한 모든 부호들의 집합으로 구성된 탐색공간은 Eq. (3)과 같이 표현된다.

$$F = \{1, 2, \dots, m\}^n \quad (3)$$

타부탐색의 기본적 요소인 움직임(move)들은 i 번째 규칙의 결론부를 수정함으로써 수행되며, 본 논문에 적용된 모형은 Eqs. 4(a)~4(d)와 같은 유형의 움직임을 사용하여 타부탐색을 수행하였으며, Fig. (3)은 부호화를 통한 타부탐색의 퍼지규칙 학습과정을 보여주고 있다.

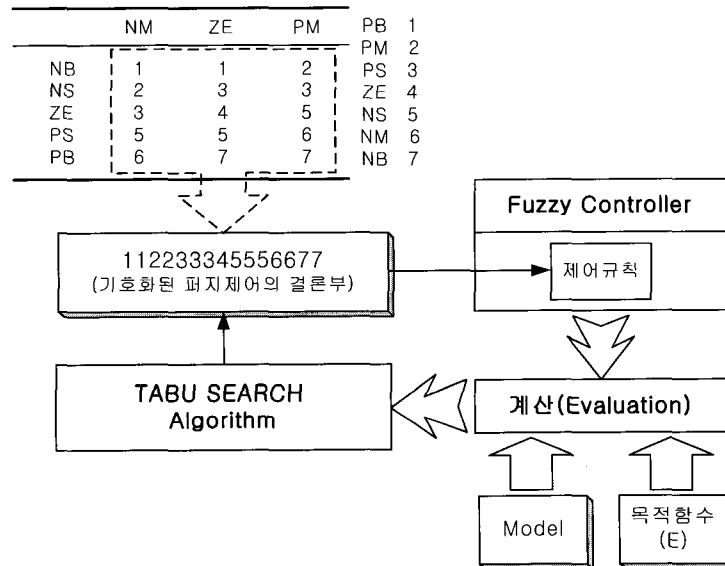
$$\mu_{i1}(j) = \max(1, j - [m/2]) \quad : \quad i \text{ 번째 규칙에 대한 결론부의 큰 감소} \quad (4a)$$

$$\mu_{i2}(j) = \max(1, j - 1) \quad : \quad i \text{ 번째 규칙에 대한 결론부의 작은 감소} \quad (4b)$$

$$\mu_{i3}(j) = \min(m, j + 1) \quad : \quad i \text{ 번째 규칙에 대한 결론부의 작은 증가} \quad (4c)$$

$$\mu_{i4}(j) = \min(m, j + [m/2]) \quad : \quad i \text{ 번째 규칙에 대한 결론부의 큰 증가} \quad (4d)$$

여기서, j 는 부호화된 결론부의 퍼지규칙이다.



주) NB, NS, ZE, PS, PB는 퍼지이론에서 퍼지집합의 일반적인 표기방법(NB : negative big, NS : negative small, ZE : zero, PS : positive small PB : positive big)

Fig. 3. 부호화를 통한 타부탐색의 퍼지규칙 학습과정

3. 저수지 운영을 위한 퍼지-타부탐색 모형의 구성

퍼지제어를 위한 입력변수로는 유입량과 저류량을 사용하였다. 유입량의 경우, 홍수초기 방류계획을 수립하는 단계에서의 예측유입량만을 고려하여 불확실한 예측유입량 자료에 대한 퍼지-타부탐색 모형의 효과를 살펴보고자 하였다. 저류량의 경우는 현 저류량(수위-저류량 관계곡선에 의해 결정)으로부터 Eq. (5)와 같이 유입량과 모형을 통해 결정된 방류량에 의해 다음 시간의 저류량이 계산되었다.

$$S_{t+1} = S_t + [I_t - O_t] \quad (5)$$

여기서, S 는 저류량, I 는 유입량, O 는 방류량, t 는 시간단위이다. 또한, 삼각형 소속함수를 사용하여 각 변수에 대한 퍼지집합을 표현하였으며, 퍼지공간은 입력변수인 유입량과 저류량을 5개로 분할하고, 출력변수인 방류량은 적절한 시간내에 탐색을 수행함과 동시에 충분한 제어가능성이 발휘될 수 있도록 7개의 퍼지공간으로 분할하였다.

퍼지제어를 위한 규칙기반(rule base)은 부호화된 타부탐색을 이용하여 퍼지규칙의 결론부를 자동적으로 설정하였다. Table 1은 행렬로 나타낸 퍼지규칙의 예와 부호화된 퍼지규칙의 결론부를 나타낸다.

규칙기반 설정을 위한 타부탐색의 목적함수를 Eq. 6(a)와 같이 구성하였다. 최대한 홍수량을 댐에 저류하여 하류부 홍수피해를 줄일 수 있도록 Eq. 6(b)와 같이 방류에 의한 댐의 현저류량과 홍수위에 해당하는 저류량과의 차가 최소가 되게 설정하였으며, 저수지 운영상의 현실을 감안하여 Eq. 6(c)와 같이 단위 시간당 방류량 전단계의 차를 최소화하는 조건을 고려하였다.

$$F = F_1 + \omega \cdot F_2 \quad (6a)$$

$$F_1 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [\text{홍수위 해당저류량} - \text{현 저류량}(S_t)] \quad (6b)$$

$$F_2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [|O(t+1) - O(t)|] \quad (6c)$$

여기서, O : 방류량, ω : 가중인자, N : 자료수, 홍수위 해당저류량 : 수위-저류량 관계곡선에 의한 홍수위에 해당하는 저류량이다. 퍼지추론 방식으로는 Mamdani(1974)의 Max-Min합성을 사용하였으며, 비퍼지화는 소속함수의 가중평균이나 소속함수에 의해 구분된 영역의 무게중심을 실제값으로 정하는 면적중심법(Center Of Area method, COA)을 적용하여 퍼지값을 실제값(crisp value)으로 변환하였다. 홍수시 저수지 운영을 위한 퍼지-타부탐색 과정은 Fig. 4와 같다.

4. 퍼지-타부탐색 모형의 적용 및 결과

4.1 대상유역 현황 및 홍수사상의 선정

충주 다목적댐은 남한강 수계에 건설된 국내 최대의 콘크리트 중력식댐으로, 남한강 유역이 보유하고 있는 수자원을 효율적으로 개발하여 하류지역에 각종 용수를 공급하고 수력에너지를 생산하여 첨두전력수요(최대전력소요시기)에 대처하는 한편, 하류지역의 홍수피해를 경감시킬 목적으로 건설된 댐이다. 높이 97.5m, 길이 447m, 용적 90만2천m³, 저수용량 27억5천만m³의 댐으로써 유역면적이 6,648km²에 이르는 거대한 댐으로, 본댐 하류 19.6km 지점에는 높이 21m, 길이 480.7m, 수문 20개를 가진 조정지댐을 갖추고 있다.

대상 홍수사상의 선정에 있어 충주댐의 과거 저수지 운영자료(1986년 1월~2003년 12월)를 검토한 후 비교적 큰 첨두방류를 실시하였던 1990년의 홍수를 선정하였다. 한국수자원공사(1991)에 수록된 예측유입량 자료

Table 2. 퍼지규칙의 행렬식 표현과 부호화된 퍼지규칙 결론부

입력부 퍼지집합		저류량				
		VL	L	M	H	VH
유입량	VL	1	1	1	2	2
	L	2	2	3	3	3
	M	3	4	4	4	4
	H	5	5	5	6	6
	VH	6	6	6	7	7

결론부 퍼지집합	부호화된 규칙
VVL(Very Very Low)	1
VL(Very Low)	2
L(Low)	3
M(Medium)	4
H(High)	5
VH(Very High)	6
VVH(Very Very High)	7

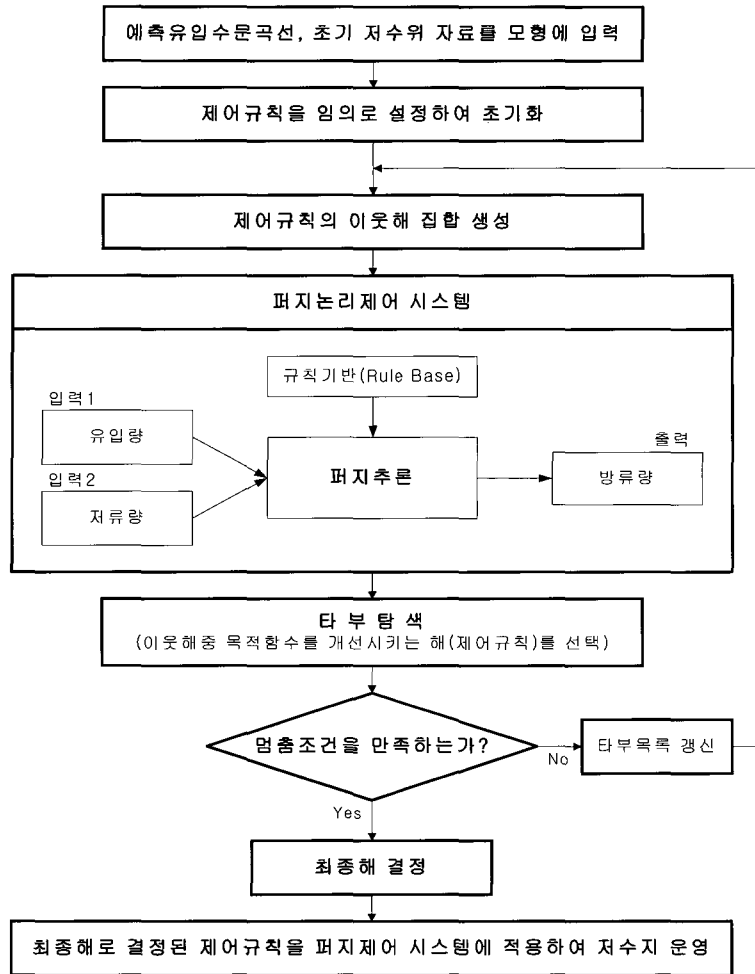


Fig. 4. 홍수시 저수지 운영을 위한 퍼지-타부탐색 과정

를 바탕으로 타부탐색을 이용하여 퍼지 제어규칙을 최적화한 후, 실측유입량에 대해 저수지 모의운영을 실시하였다.

4.2 모형의 적용

1990년 9월 10일부터 14일시까지의 홍수에 대해 저수지의 초기수위는 제한수위 EL. 138m보다 낮은 EL. 135.7m였으나, 침투유입량이 $21,241m^3/s$ 로서 충주댐의 설계홍수량 $18,000m^3/s$ 을 훨씬 초과하여 방류기간 중 저수위가 계획홍수위 EL. 145m를 넘어 EL. 146.03m를 기록할 만큼 대규모 홍수가 발생하였다.

이러한 홍수사상에 대해 본 논문에서는 입력변수인 유입량의 범위로서 상한과 하한을 각각 설계홍수량 $18,000m^3/s$ 와 0으로 설정하였으며, 저류량 범위의 상한은 계획홍수위 EL. 145m의 해당저류량으로, 그리고 하한은 제한수위 EL. 138m의 해당저류량으로 설정하였다. 또한 출력변수인 방류량의 범위는 실제 운영결과와의 비교를 위하여 같은 조건인 최대방류량 $14,000m^3/s$

을 상한으로 설정하였다. Table 2는 본 논문에서 사용한 가중인자(ω)를 나타내고 있으며, 0~1까지 0.1간격으로 모두 적용한 후 결과값이 두드러진 차이를 나타내는 값들을 선택하여 목적함수를 작성하였다. 여기서, FTS는 Fuzzy-Tabu Search를 줄여서 표기한 것이며 뒷자리 번호는 가중인자들에 따른 모형을 분류하기 위해 사용하였다.

Table 2. 본 논문에 적용된 목적함수

구 분	목 적 함 수
FTS0	$F = F_1$
FTS1	$F = F_1 + 0.2 F_2$
FTS2	$F = F_1 + 0.4 F_2$
FTS3	$F = F_1 + 0.6 F_2$
FTS4	$F = F_1 + F_2$

Figs. 5~9는 각각의 목적함수에 따른 저수지 운영 결과를 나타내고 있다. FTS0, FTS2, FTS3 모형의 경우, 저수지 운영기간 중 일시적으로 급격한 방류량 변화를 나타내었는데 이것은 예측유입수문곡선에 의해 최적화된 모형이 예측유입량과 다른, 즉 실제유입량으로

인하여 그 상태에 해당하는 다른 제어규칙을 적용함에 따른 것으로, 실제 저수지 운영에 있어서 여수로 방류를 위한 수문조작에 어려움이 따를 것으로 생각된다. 하지만 이러한 결과는 퍼지제어 시스템의 불확실한 입력에 대한 적응성을 나타내는 것으로, 홍수시 저수지

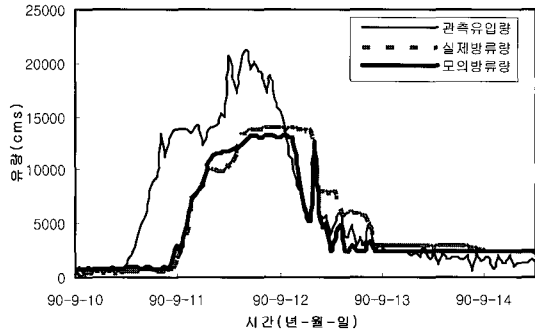


Fig. 5. FTS0 모형에 의한 저수지 운영 및 저수위 곡선

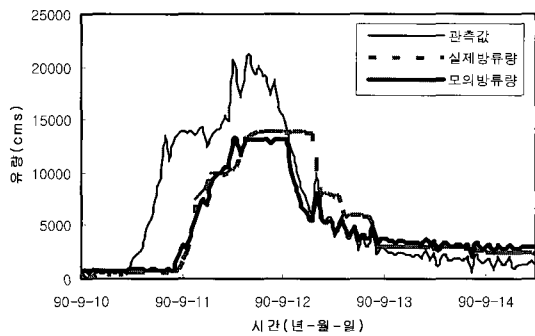


Fig. 6. FTS1 모형에 의한 저수지 운영 및 저수위 곡선

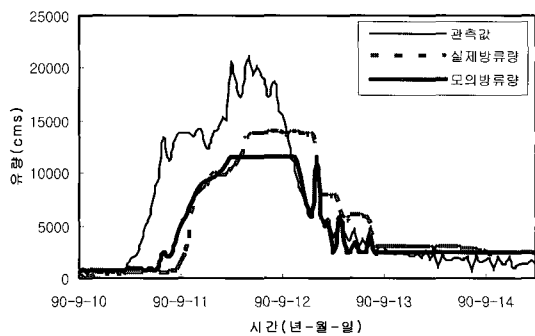


Fig. 7. FTS2 모형에 의한 저수지 운영 및 저수위 곡선

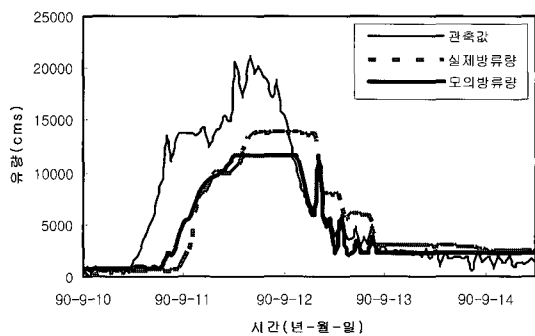


Fig. 8. FTS3 모형에 의한 저수지 운영 및 저수위 곡선

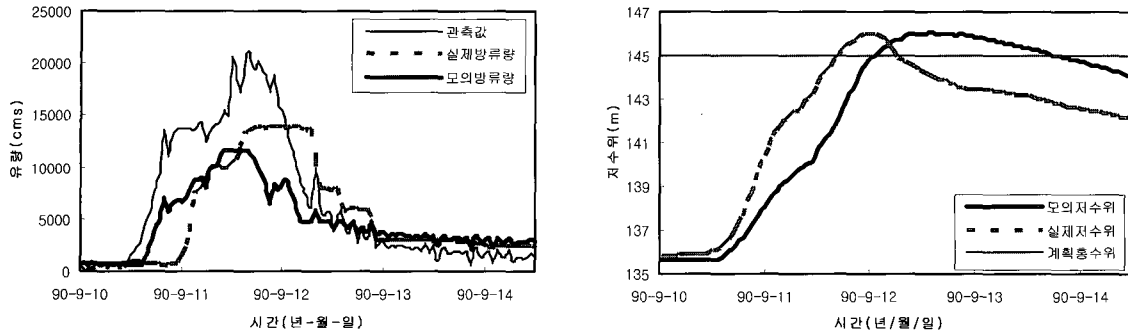


Fig. 9. FTS4 모형에 의한 저수지 운영 및 저수위 곡선

Table 3. 1990년 홍수사상에 대한 모형별 홍수조절을 및 저수지 운영결과

모형	첨두유입량 (m^3/s)	첨두방류량 (m^3/s)		홍수조절율 (%)		첨두수위 (m)		홍수 후 수위 (m)		총방류량 ($10^6 \times m^3$)	
		실제	모의	실제	모의	실제	모의	실제	모의	실제	모의
FTS0			13,206		37.83		145.43		144.63		1,827
FTS1			13,218		37.77		145.89		143.85		1,901
FTS2	21,241	14,000	11,620	34.09	45.29	146.03	145.61	142.09	144.81	2,064	1,810
FTS3			11,620		45.29		145.62		144.82		1,809
FTS4			11,620		45.29		146.06		144.06		1,881

운영방안을 결정할 때 가장 큰 문제가 되고 있는 예측 유입량의 불확실성에 대한 고려가 미비한 현재의 운영 방법과 비교될 수 있다.

저수지 홍수조절효과의 평가는 하류의 하도추적모형에 의한 홍수피해를 산정하여 그 결과를 분석하여야 하지만, 본 논문에서는 간략하게 Eq. (7)과 같은 홍수조절율을 사용하여 저수지의 홍수조절효과를 살펴보았으며, Table 3은 그 결과를 나타낸 것이다. FTS0~FTS4로 가중인자(ω)가 증가할수록 홍수조절율 37.83%~45.29%로 커짐을 알 수 있다. 이는 Eq. 6(c)에서 알 수 있듯이 방류량 변화를 줄이려는 경향이 강해지기 때문에 첨두가 낮아져 피진 종모양 같은 형태로 방류수문곡선이 최적화되기 때문이다. 이에 따라 Eq. (7)에서 첨두방류량의 비율이 작아져 가중인자(ω)가 증가할수록 홍수조절율이 증가하게 된다.

$$\text{홍수조절율} = \frac{\text{첨두유입량} - \text{첨두방류량}}{\text{첨두유입량}} \times 100\% \quad (7)$$

모형별 저수지 운영결과를 나타내는 것으로, 홍수기간 동안 첨두수위 EL. 146.06m를 나타낸 FTS4 모형을 제외하고는 모형들의 결과가 실제운영보다 낮은 첨두수위를 나타내었다. 비록 모든 모형의 첨두수위가 계획홍수위인 EL. 145m를 초과하였으나, 1990년 홍수사상의 경우 첨두유입량이 약 21,000 m^3/s 로 계획홍수량인

18,000 m^3/s 을 훨씬 초과하는 극심한 홍수사상이었음을 감안할 때, 퍼지-타부탐색 모형에 의한 저수지 운영은 홍수기간 동안 실제운영보다 첨두수위를 낮게 유지하였으므로 댐의 안전한 측면에서 향상된 결과를 나타낸다고 할 수 있다. 또한 홍수 후 수위에 있어서는 모형에 의한 결과가 실제 운영결과보다 높음을 확인할 수 있는데, 이것은 타부탐색을 통하여 홍수량을 최대한 저류시키도록 제어규칙을 최적화하였기 때문이며, 이러한 결과는 홍수 후 용수공급, 발전방류, 하천유지 등의 기능을 수행해야 하는 다목적 댐의 이수적 측면에 있어서 이전의 운영방법보다 효율적이라는 것을 알 수 있다. 하지만, 홍수기 중에는 댐의 홍수방어능력을 증대시킬 수 있도록 법적으로 제한수위를 유지하도록 되어있으므로, 홍수가 끝난 후 다른 홍수가 예상될 때에는 예비방류 등의 방법으로 저수위를 낮춰야 할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 홍수시 저수지 운영 시스템의 방류량 결정에 필요한 예측정보의 불확실성을 고려하기 위해 퍼지제어 이론을 적용하였다. 저수지의 홍수조절효과를 극대화하기 위해 전역최적화 기법인 타부탐색을 사용하여 퍼지제어규칙들을 최적화함으로써 홍수시 저수지 운영을 위한 퍼지-타부탐색 모형을 구성하였다. 충주 다목적댐을 대상으로 과거 홍수사상에 대하여 퍼지-타부

탐색 모형을 적용해 모의운영하고, 그 결과를 실제 운영방법과 비교분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 퍼지제어 시스템은 입력정보를 퍼지집합이란 상태공간의 일부로서 간주하여 제어시 각각의 퍼지 집합을 기준으로 처리하기 때문에 정보의 불확실성에 대한 허용범위를 가질 수 있다. 따라서 홍수시 저수지의 운영이 예측정보의 불확실성으로 인하여 대부분 운영자의 주관적 판단에 의해 운영이 되고 있다는 현실을 감안한다면 퍼지제어 이론의 적용은 이러한 불확실성을 고려할 수 있는 대안이 될 것이다.
- (2) 퍼지제어는 시스템을 표현하는 변수의 수가 많아지고, 변수의 상태공간이 세분화될수록 정확한 제어를 할 수 있다. 이를 위해 각 상태에 맞는 제어규칙들이 모두 설정되어야하지만, 전문가의 지식을 반영하던 방법으로는 전문가가 판단할 수 있는 상태에 대해서만 제어규칙을 설정하였기 때문에 효율적인 제어가 이뤄지지 않았다. 따라서 본 연구에서 사용된 타부탐색을 통한 방법은 모든 상태를 고려해 제어규칙들을 자동적으로 설정할 수 있으므로, 퍼지제어 시스템의 성능을 개선시킬 수 있을 것으로 생각된다.
- (3) 타부탐색을 통해 댐이 안전한 범위에서 홍수조절 효과를 극대화시킬 수 있도록 제어규칙들을 최적화하여 저수지 운영에 적용한 결과, 첨두방류량이 감소되어 홍수조절율이 개선되었으며, 총 방류량 또한 감소되어 실제 운영방법에 비해 치수적 측면에 있어서 향상된 결과를 나타냈다. 또한 홍수 후에는 가용한 수자원의 양이 증대되어 이수적 측면에도 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 본 연구에서는 단순히 홍수량을 최대한 저류시킴으로써 홍수조절효과를 극대화 하고자 하였으나, 향후에 하류부 홍수추적을 통한 홍수피해를 고려하여 제어규칙들을 최적화한다면 홍수시에 보다 효율적인 저수지 운영 시스템을 구성할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

김여근, 윤복식, 이상복 (1997). 메타 휴리스틱. 영지문화사.
 김한섭, 이정규 (1998). “강우-유출 예측모형에 퍼지기법의 적용.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**,

한국수자원학회, Vol. 1998, No.98, pp.109-114.
 김한섭, 이정규 (2000a). “홍수예보를 위한 통합저류함수모형의 퍼지제어(I) - 이론 및 모형의 수립.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제6호, pp. 689-699.
 김한섭, 이정규 (2000b). “홍수예보를 위한 통합저류함수모형의 퍼지제어(II)-모형의 적용.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제6호, pp. 701-709.
 김형수, 나창진, 김중훈, 강인주 (2002). “퍼지론에 의한 강수예측 : II. 퍼지 시계열의 적용성.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제1호, pp. 631-638.
 나창진, 김형수, 김중훈, 강인주 (2002). “퍼지론에 의한 강수예측 : I. 뉴로-퍼지 시스템과 마코프 연쇄의 적용.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제32권, 제1호, pp. 619-629.
 심명필, 박인보, 선우중호, 황만하 (1990). “홍수기중 실시간 저수지 운영(I) - 대청댐의 단일 저수지 운영 방안.” **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제23권, 제3호.
 심명필, 이재형, 권오익 (1996). “홍수예측에 의한 예비 방류 방안.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제29권, 제1호, pp. 235-247.
 심재현, 김지태 (1998). “퍼지제어기법을 이용한 치수목적의 저수지 운영기법.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 203-208.
 심재현, 조원철, 이원환 (1992). “자기 조정력을 가진 퍼지제어기법에 의한 우수배제펌프의 적응제어.” **한국수자원학회지 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 291- 299.
 오영민, 이길성 (1986). “Min-Max DP에 의한 소양 및 충주호의 홍수조절 운영.” **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제19권, 제4호, pp. 339-344.
 이광형, 오길록 (1991). 퍼지이론 및 응용. 홍릉과학출판사.
 이길성, 정동국 (1985). “홍수시 충주댐 운영방안의 비교검토.” **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제18권, 제3호, pp. 225-233.
 이재형, 이길성, 정동국 (1992). “Incremental DP에 의한 홍수시 댐군의 연계운영.” **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제25권, 제2호, pp. 47-59.
 이한규, 이상호 (1998). “복합 모델링 기법을 이용한 홍수시 저수지 최적 운영(사례 연구 : 충주 다목적 저수지)” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제

- 31권, 제6호, pp. 727-739
- 조원철, 심재현 (1992). "Fuzzy 이론의 수문학에의 적용(I, II)." *한국수자원학회지*, 한국수자원학회, 제 25권, 제1호, pp. 47-52, pp. 59-63.
- 한국수자원공사 (1991). **충주댐 및 소양강댐유역 1990년 대홍수의 수문학적 분석.**
- Bagis, A. (2002). "Determining fuzzy membership functions with tabu search - an application to control." *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 139, pp. 209-225.
- Campbell, P.F. (1993). "Application of fuzzy set theory in reservoir operation." MASC thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Denna, M., Mauri, G., Zhaboni, A. M. (1999). "Learning Fuzzy Rules with Tabu Search - An Application to Control." *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 7, No. 2, pp. 295-318.
- Dubrovin, T., Jolma, A., Turunen, E.(2002). "Fuzzy Model for Real-Time Reservoir Operation." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 28, No. 1, pp. 66-73.
- Glover, F.(1989). "Tabu Search - Part I." *ORSA Journal on Computing*, Vol. 1, No. 3, pp. 190-206.
- Glover, F.(1990). "Tabu Search - Part II." *ORSA Journal on Computing*, Vol. 2, No. 1, pp. 4-32.
- Karaboga, D. (1996). "Design of Fuzzy Logic Controllers Using Tabu Search Algorithm." Biennial Conf. North American Fuzzy Inf. Processing Society, pp. 489-491.
- Mamdani, E.H. (1974). "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant." in *Proc. IEEE control and Science*, Vol. 121, No. 12.
- Mori H., Sone, Y., Moridera, D., Kondo, T. (2000). "A Parallel Tabu Search Based Fuzzy Inference Method for Short-term Load Forecasting." *Power Engineering Society Winter Meeting*, Vol. 3, pp. 1702-1707.
- Panigrahi, D.P., Mujumdar, P.P. (2000). "Reservoir Operation Modelling with Fuzzy Logic." *Water Resources Management*, Vol. 14, pp. 89-109.
- Russell, S.O., Campbell, P.F. (1996). "Reservoir Operating Rule with Fuzzy Programming." *Water Resources Planning and Management*, Vol. 122, No. 3, pp. 165-170.
- Shrestha, B.P., Duckstein, L., Stakhiv, E.Z.(1996). "Fuzzy Rule-Based Modeling of Reservoir Operation." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 122, No. 4, pp. 262-269.
- Zadeh, L.A.(1965). "Fuzzy sets." *Inform. Contr.*, Vol. 8, pp. 338-353.
- (논문번호:05-59/접수:2005.04.21/심사완료:2005.08.02)