

# 방류량 제어 기능을 갖는 퍼지 기법에 의한 댐 수문 제어

우영운\* · 이수종\*\* · 김광백\*\*\*

\*동의대학교 멀티미디어공학과

\*\*협성대학교 컴퓨터공학과

\*\*\*신라대학교 컴퓨터정보공학부

## Controlling Gates of Dams by Fuzzy Methods with Outflow Control Function

Young Woon Woo\* · Soo-Jong Lee\* · Kwang-Baek Kim\*\*

\*Dept. of Multimedia Eng., Dong-Eui University

\*\*Dept. of Computer Eng., Hyeobseong University

\*\*\*Division of Computer and Information Eng., Silla University

E-mail : ywwoo@deu.ac.kr, sjlee@uhs.ac.kr, gbkim@silla.ac.kr

### 요 약

댐의 수문 제어는 유입량이 변하는 동안 이루어지는 복잡하고 비선형적인 제어이다. 이 논문에서는 퍼지 기법을 이용하여 유입량이 변하는 동안의 수문을 효과적으로 제어하기 위한 방법을 제안하였다. 특히 단순히 수문 제어에만 머물지 않고 가뭄 때를 대비하여 적정 수위를 유지할 수 있도록 하는 기능과 방류량을 제어할 수 있도록 하는 기능을 보완하였다. 이를 위하여 일반적으로 사용되는 정적인 퍼지 함수를 사용하지 않고 상황에 따라 함수값이 변하는 동적 퍼지 추론 기법과 방류량 제어를 위한 퍼지 규칙을 함께 적용함으로써 방류량을 제한할 수 있도록 하는 기법을 제안하였다. 제안한 기법을 이용하여 시뮬레이션 실험을 실시한 결과 수문 제어 기능뿐만 아니라 사용자가 지정한 적정 수위를 유지하고 정해진 방류량을 넘지 않도록 하는 방식으로 댐 수문 제어가 이루어짐을 확인할 수 있었다.

### 키워드

댐 수문 제어, 적정 수위, 방류량 제어, 동적 퍼지 추론 기법

## 1. 서 론

댐을 안전하고 효율적으로 관리하기 위해서는 방출되는 물의 양을 늘리거나 줄이도록 수문을 제어하는 처리 과정이 가장 중요하다. 현재 수문 관리는 상황에 따라 노련한 전문가에 의해 관리되고 있다. 전문가도 일반인과 같은 인간이므로 상황에 따라 부정확한 판단을 내릴 수도 있고, 수문 관리는 복잡하고 확률적으로 작용하기 때문에 유입량에 따른 결정이 어렵다는 특징을 갖고 있다. 실제로 유입량과 방류량은 시간의 변화에 따라 불규칙적으로 변하기 때문에 댐 수문 관리 시스템을 제작하기 매우 어려운 것으로 알려져 있다[1].

이러한 복잡한 댐 수문을 효과적으로 제어하기 위해서 이미 몇 가지 방법들이 고안되었다. Can과 Houck[2]은 다중 저수 시스템을 시간 단위로 관리하기 위한 목표 프로그래밍 모델을 제안하였고, Oshimaa와 Kosudaa[3]는 결정적 카오

스 기법을 이용하여 요구 예측에 의한 분산 댐 제어 접근 방법을 제안하였다. Liang 등[4]은 수위를 예측하기 위해 신경망 기법에 의한 예측 도구를 개발하여 방글라데시에 있는 Dhaka 댐에 적용하기도 하였다. 특히 Dervis Karaboga[5]는 직관적으로 성립된 25가지 퍼지 규칙과 이 규칙을 TS 알고리즘(Tabu Search algorithm) [6]을 이용하여 최적화시킨 15가지 퍼지 규칙을 이용하는 댐 수문 제어 기법을 제안하였다. 하지만 이 방법에서는 적정 수위를 유지하는 것이 아니라 댐의 최저 수위에 항상 수렴하는 특성을 갖고 있다.

그러나 일반적인 환경에서는 평소에도 적정 수위를 유지함으로써 가뭄 때에 부족한 생활용수나 농업용수를 보존할 필요가 있다. 또한 항상 적정 수위를 유지하는 것이 아니라 유입량의 변화가 생기는 경우에는 갑작스런 유입으로 인한 댐의 범람을 막기 위해 미리 방류할 수 있도록 하는 기능을 함께 가져야 한다. 또 한 가지 댐

수문 제어에서 중요한 기능은 방류량을 적절히 제어하는 것이다. 만약 유입량이 갑작스럽게 증가한다고 하여 이를 일시적으로 모두 방류해 버린다면 하류 지역에서는 갑작스런 강의 수위 증가로 인하여 범람이나 홍수를 야기할 수 있다.

따라서 이 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 기존의 정적인 퍼지 기법을 사용하는 것이 아니라 상황 변화에 따라 능동적으로 대처가 가능하도록 하는 동적 퍼지 추론 기법과 이 기법에 의해 산출된 댐 수문 제어 결과 함수와 방류량 제어를 위한 규칙들에 의해 산출된 댐 수문 제어 결과 함수를 함께 고려하여 비퍼지화된 최종 수문 제어값을 구하는 처리 기법을 제안하였다. 제안한 기법들의 성능을 평가하기 위해 Dervis Karaboga가 제안한 방법과의 비교 실험을 실시하였으며 그 분석 결과를 제시하였다.

## II. 퍼지 기법을 이용한 댐 수문 제어

퍼지를 이용한 댐 수문 제어를 위한 입력 변수로는 수위와 관련된 Lake\_Level(H)과 변화 수위와 관련된 Delta\_Level(dH) 그리고 적정 수위와 관련된 Fit\_Level이고 출력 변수는 Gate(d)이다. Lake\_Level, Delta\_Level, Fit\_Level의 표준화 간격으로는 Lake\_Level과 Fit\_Level은 최저 수위 118m부터 최고 수위 127m이고, Delta\_Level은 최저 -1m부터 최고 1m이고, Gate는 최저높이 0m부터 최고 높이가 12m로 정하였다.

퍼지 기법을 이용한 댐 수문 제어를 위한 전제적인 공통 처리 기법은 다음과 같다.

표 1과 같이 25가지의 퍼지 추론 규칙이 경험적으로 구성되었고, 각 퍼지 변수에 대한 소속도(membership grade)는 그림 1과 같이 세 종류의 퍼지 멤버십 함수(fuzzy membership function)에 의해 표현된다.

변화 수위에 관한 퍼지 입력은 총 5 단계로 나누어진다. 즉, Negative Big(NB), Negative Small(NS), Zero(Z), Positive Small(PS), Positive Big(PB)로 나누어진다. 입력 값의 계산 과정은 다음과 같다.

- 방류량 = Gate × OutFlow (1)
- 변화량 = (유입량 - 방류량) × 3600 (2)
- 변화후용량 = 현재수위에 따른용량 + 변화량 (3)
- Delta\_Level = 변화량에 의해 변화된 수위 - 현재수위 (4)

표 1. 댐 수문 제어를 위한 25가지 퍼지 추론 규칙

	dH					
H		NB	NS	ZE	PS	PB
VL		VL	VL	VL	VL	VL
L		L	L	L	L	L
M		M	M	M	M	M
H		H	H	H	H	H
VH		VH	VH	VH	VH	VH

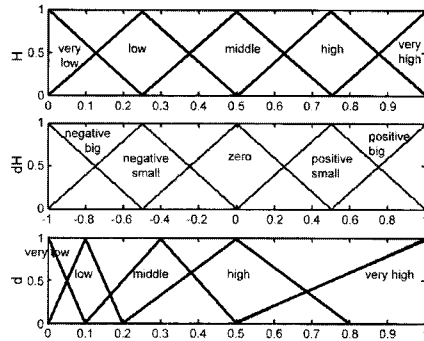


그림 1. 댐 수문 제어를 위한 퍼지 멤버십 함수

OutFlow는 1m 변화에 따라 700m<sup>3</sup>/s이고, 수식 (2)에서 3,600을 곱하는 이유는 유입량과 방류량은 단위가 초(second) 단위이고 현재용량은 시(hour) 단위이기 때문이다. 표 2와 같이 수위에 따른 용량을 이용해서 변화 후 용량과 수위를 알아낸다.

수문 제어를 위한 출력값을 산출하기 위해서는 표 1과 같이 직관적으로 성립된 25가지의 퍼지 규칙들을 사용하였으며 추론 기법으로는 Mamdani의 Max-Min 추론 기법[7]을 이용하였다. 또한 비퍼지화(Defuzzification) 방법으로는 Center of Sum 방법을 사용하였다. 여기서 Center of Sum 방법을 사용한 경우에는 특성 상 한 번 수문이 열리면 절대 닫히지 않는 단점이 나타난다. 따라서 이 점을 보완하기 위해 비퍼지화 과정에서 Very Low(VL)에 한해서는 최종 출력값(z)에 0을 곱하였다.

표 2. 수위에 따른 저장 용량

수위(m)	저장용량(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
112.5	1250
115.0	1420
117.5	1560
120.0	1735
122.5	1900
125.0	2120
127.5	2310
130.0	2550

이 논문에서는 이상에서 설명된 처리 기법을 기반으로 하여, 적정 수위를 유지하고 방류량을 제어하기 위해 수위에 관한 퍼지 멤버십 함수가 적정 수위(Fit\_Level)에 따라 변화하는 동적 퍼지 함수와 방류량 제어를 위한 퍼지 규칙을 함께 적용하는 기법을 제안하였다.

### 2.1 적정 수위 유지를 위한 제안 기법

적정 수위 유지를 위해 제안한 기법은 기존

퍼지 단계를 그대로 유지하면서 함수 폭을 줄이는 방법이다. 이 기법에서 수위에 관한 퍼지 함수를 결정하는 방법은 다음과 같다.

이 기법에서는 수식 (5)에 의해 각 단계별 사이의 좌우 간격이 나오게 되고, 그 간격에 따라 그림 2와 같이 수위에 관한 퍼지 함수들이 결정된다.

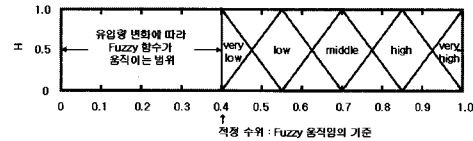


그림 2. 제안 기법의 수위에 관한 퍼지 함수

$$Step = (1 - Fit\_Level) / 4 \quad (5)$$

예를 들어 적정수위가 0.4인 경우에는 Step이 (1-0.4)/4로 0.15가 되므로 퍼지 함수의 x축 절편이 0.4, 0.55, 0.7, 0.85, 1.0의 5가지 값을 사용하게 되므로 퍼지 함수는 항상 5개를 다 사용하되 그 간격만 줄어들게 된다.

유입량 변화가 없고 일정한 경우에는 적정 수위(Fit\_Level) 값을 그대로 유지하고 유입량에 변화가 발생하는 경우 적정 수위 값을 변경한다. 유입량의 변화는 수식 (6)과 같이 정의된다.

$$\text{유입량 변화} = \text{현재 유입량} - \text{이전 유입량} \quad (6)$$

수식 (6)에서 유입량의 변화가 양수인 경우에는 적정 수위 값을 0이 될 때까지 시간에 따라 감소를 시키고, 음수인 경우에는 적정 수위 값을 적정 수위가 될 때까지 시간에 따라 증가를 시킨다. 시(hour)를 단위로 하여 수식 (5)를 계속 반복하는 방식으로 처리가 이루어진다.

### 2.2 방류량 제어를 위한 제안 기법

방류량 제어를 위해 제안한 기법에서는 댐 수문 제어에 관계되는 아래의 3가지 퍼지 규칙을 제안하였다.

- IF 초과방류율 IS low  
THEN Gate(d) is high
- IF 초과방류율 IS middle  
THEN Gate(d) is middle
- IF 초과방류율 IS high  
THEN Gate(d) is low

이 규칙들은 현재 수위(Lake\_Level)가 지정된 댐의 최대수위보다 낮고 현재 방류량(OutFlow)이 지정된 최대방류량보다 높을 경우에만 동작 되도록 한다. 이상의 규칙에서 나타난 초과방류율 입력값은 현재 방류량과 허용되는 최대방류량을 이용하여 수식 (7)과 같이 계산되며, 이 값

을 그림 3에 나타난 퍼지 함수들에 대한 입력으로 사용하고 Gate(d)에 대한 출력 결과를 그림 1의 Gate(d)에 대한 퍼지 출력 함수에 의해 산출한 후, 이 결과를 앞 절에서 제안한 기법에 의한 출력 결과와 함께 이용하여 비퍼지화를 수행함으로써 최종 댐 수문의 개방 높이를 계산하게 된다.

$$\text{초과방류율} = \frac{(\text{현재방류량} - \text{최대방류량})}{\text{최대방류량}} \quad (7)$$

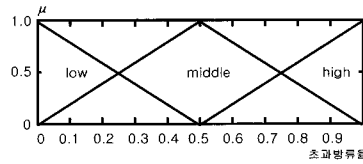


그림 3. 방류량 제어를 위한 입력 퍼지 함수

## III. 실험 결과 및 분석

### 3.1 적정수위 유지를 위한 제안 기법의 실험 결과

이 논문에서 제안한 기법들의 성능을 비교하기 위하여 그림 4에 나타나 있는 것처럼 VC++ 6.0을 이용하여 시뮬레이션 프로그램을 구현하였다. 이 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 동일한 유입량 데이터와 적정 수위(122m)를 가지고 초기 현재 수위를 두 가지 경우(낮음, 높음)로 설정하여 Dervis Karaboga가 제안한 기법과 이 논문에서 제안한 기법을 비교 실험하였다. 각 그림에서 'Prop#2'가 이 논문에서 제안한 기법을 나타낸다.

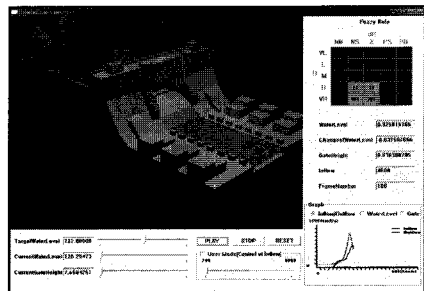


그림 4. 구현된 시뮬레이션 프로그램

첫 번째 시뮬레이션 실험으로서 초기 현재 수위를 낮은 수위로 했을 때를 비교해 보면(그림 5-7), 유입량의 변화에 따라 수위의 변화는 이 논문에서 제안한 방법들과 Dervis Karaboga가 제안한 방법이 비슷한 형태로 변하지만 이 논문에서 제안한 방법에 따른 수문 높이는 현재 수위가 적정 수위가 될 때까지 수문을 개방하지 않다가 적정 수위를 넘어서는 순간부터 수문을 개방하

게 된다. 그리고 유입량의 변화가 다시 일정하게 되는 경우 Dervis Karaboga가 제안한 방법은 최저 수위로 수렴하려고 하지만 이 논문에서 제안한 방법들은 적정 수위 이하로 내려가지 않고 유지하는 특성을 보였다.

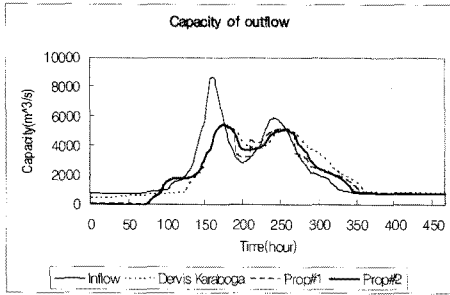


그림 5. 낮은 수위에서의 방류량 변화

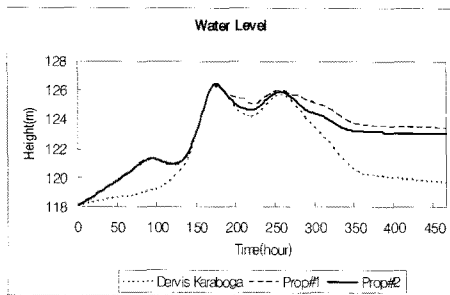


그림 6. 낮은 수위에서의 수위 변화

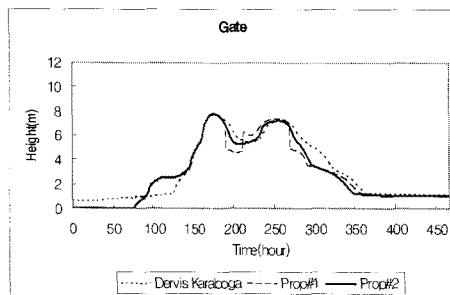


그림 7. 낮은 수위에서의 수문 변화

두 번째 시뮬레이션 실험으로서 초기 현재 수위를 높은 수위(125m)로 했을 때를 비교해 보면 (그림8-10), 기존의 기법과 제안한 기법 2가지는 모두 초기 수위가 적정 수위보다 높기 때문에 초기부터 수위가 내려가도록 제어하고 있다. 그러나 Dervis Karaboga가 제안한 방법은 적정 수위에 도달하여도 계속 수위를 낮추도록 제어하는 반면 제안한 기법들에서는 적정 수위에 도달

하면 방류량을 줄여 적정 수위를 유지하는 방식으로 제어하고 있다. 이 이후에 나타나는 변화는 앞의 실험 결과들과 동일함을 알 수 있다.

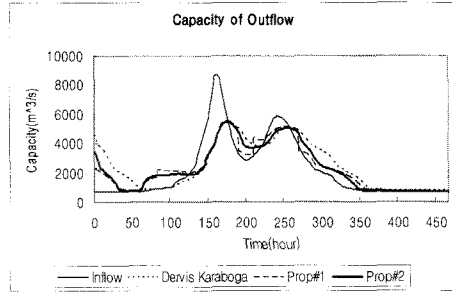


그림 8. 높은 수위에서의 방류량 변화

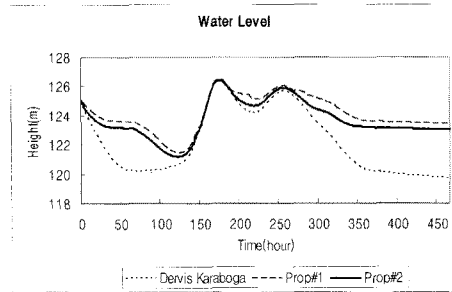


그림 9. 높은 수위에서의 수위 변화

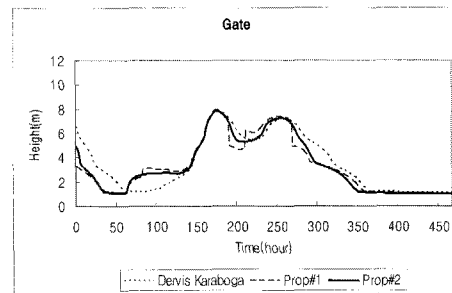


그림 10. 높은 수위에서 수문 변화

### 3.2 방류량 제어를 위한 제안 기법의 실험 결과

이 논문에서 제안한 방류량 제어 기법의 성능을 파악하기 위해 이상에서의 실험과 동일하게 유입량 데이터, 적정 수위(122m), 초기 수위를 적정 수위 등으로 설정한 후 최대방류량만을 5,000  $m^3/s$ 로 제한하는 기능을 설정하여 실험하였다. 그림 11은 최대방류량 제어 기능이 동작되는 상태에서의 유입량과 방류량 변화를 보여준다. 이 그림에서 알 수 있듯이 방류량이 5,000을 넘어서는 순간 방류량이 줄어들어 항상 5,000을

크게 초과하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 낭도록 하는 수문 높이의 변화는 그림 12와 같다. 이 그림에서 알 수 있듯이 유입량이 갑자기 증가되어 방류량을 늘리기 위해 수문이 열리다가 방류량이 5,000을 넘어서는 순간에 수문이 다시 닫히는 식으로 동작됨을 확인할 수 있다. 그림 13은 댐의 전체 수위 변화를 나타내고 있다. 이 그림에 나타나 있듯이 방류량을 제어하는 기능으로 인해 방류량을 제한하는 시점에서 전체 수위가 일시적으로 앞의 실험 결과(그림 9)보다 더 높아짐을 확인할 수 있다.

이상의 실험 결과들에서 나타나 있듯이 이 논문에서 제안한 기법은 기존 연구 결과에 비하여 관리자가 원하는 적정 수위를 유지한다는 장점과 방류량을 제어할 수 있다는 장점이 있음을 확인할 수 있었다.

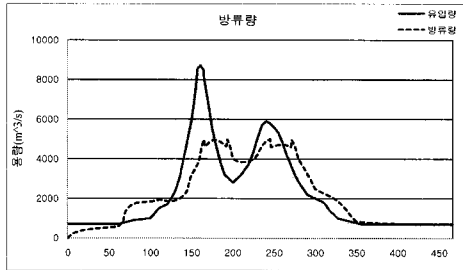


그림 11. 방류량 제어에 의한 방류량 변화

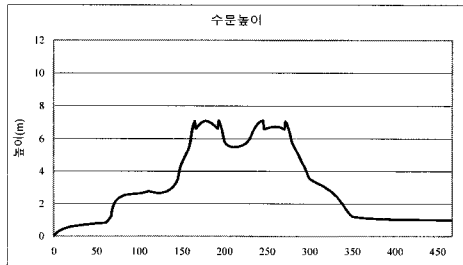


그림 12. 방류량 제어에 의한 수문 높이 변화

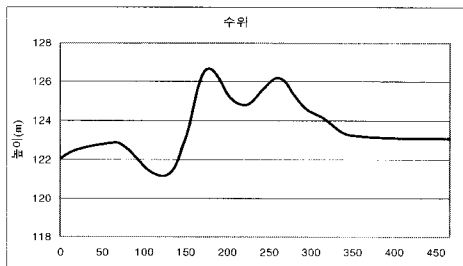


그림 13. 방류량 제어에 의한 수위 변화

#### IV. 결론

댐의 수문을 제어하기 위해서는 유입량이 갑작스럽게 변하는 경우보다 유입량이 일정한 경우가 다수 존재하고, 댐의 역할 중에 가뭄 때 물을 저장하여 부족한 생활용수나 농업용수를 채워주는 것도 중요한 역할 중에 하나로 판단되기 때문에 적정 수위 유지가 필요하다. 또한 하류지역의 범람이나 홍수에 대비하기 위하여 댐의 수위가 한계에 도달하지 않는 범위 내에서라면 방류량을 적절히 제한하는 기능도 필요하다. 따라서 이 논문에서는 기존의 댐 수문 제어 기법에 적정 수위를 유지하고 방류량을 제어할 수 있도록 하는 댐 수문 제어 기법들을 제안하고 그 성능을 시뮬레이션 실험을 통하여 비교, 분석하였다. 그 결과 제안한 기법들이 기존의 기법에서는 처리되지 않았던 적정 수위 유지 기능과 방류량 제한 기능이 동작함을 확인할 수 있었다.

그러나 이 논문에서 제안한 방류량 제어 기법에서 제안된 추가적인 규칙들이 동작되기 시작하거나 종료되는 순간에 나타나는 댐 수문 제어 값의 불연속적인 변화 문제에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각한다.

#### 참고문헌

- [1] S.L. Udall, Design of Small Dams United States department of the Interior, Bureau of Reclamation, Washington, 1961.
- [2] E.K. Can, M.H. Houck, "Real-time reservoir operations by goal programming," J. Water Resour. Plan. Manage. ASCE, Vol.110, No.3, pp.297 - 309, 1984.
- [3] N. Oshimaa, T. Kosudaa, "Distribution reservoir control with demand prediction using deterministic-chaos method," Water Sci. Technol., Vol.37, No.12, pp.389 - 395, 1998.
- [4] S. Liong, W. Lim, T. Kojiri, T. Hori, "Advance flood forecasting for flood stricken Bangladesh with a fuzzy reasoning method," Hydrol. Process., Vol.14, pp.431 - 448, 2000.
- [5] Dervis Karaboga, Aytekin Bagis, Tefaruk Haktanir, "Controlling spillway gates of dams by using fuzzy logic controller with optimum rule number," 2007.
- [6] F. Glover, "A user's guide to tabu search", Ann. Ops. Vol.41 pp.3-28, 1993.
- [7] Timothy J. Ross, Fuzzy Logic with Engineering Applications(2nd ed.), Wiley, 2004.