동적 퍼지 추론 기법을 이용한 댐 수문 제어

문태훈* · 김민석* · 김광백** · 우영운*
*동의대학교 멀티미디어공학과
**신라대학교 컴퓨터정보공학부

Controlling Gates of Dams by a Dynamic Fuzzy Inference Method

Tae-Hoon Moon* · Min-Suk Kim* · Young Woon Woo* · Kwang-Baek Kim**
*Dept. of Multimedia Eng., Dong-Eui University
**Division of Computer and Information Eng., Silla University
E-mail : ywwoo@deu.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. 또한 단순히 수문 제어에만 머물지 않고 가뭄 때를 대비하여 적정 수위를 유지할 수 있도록 하는 기능을 보완하였다. 이를 위하여 일반적으로 사용되는 정적인 퍼지 함수를 이용하지 않고 상황에 따라 함수값이 변하는 동적 퍼지 추론 기법을 제안하였다. 제안한 기법을 이용하여 시뮬레이션 실험을 실시한 결과 수문 제어 기능뿐만 아니라 사용자가 지정한 적정 수위를 유지하는 방식으로 동작함을 확인할 수 있었다.

키워드

댐 수문 제어, 적정 수위, 동적 퍼지 추론 기법

I. 서 론

댐을 안전하고 효율적으로 관리하기 위해 수문 관리는 아주 중요한 부분이다. 현재 수문 관리는 상황에 따라 노련한 전문가에 의해 관리된다. 전문가도 우리와 같은 인간이므로 상황에 따라 부정확한 판단을 내릴 수도 있고, 수문 관리는 복잡하고 확률적으로 작용하기 때문에 유입량에 따른 결정이 어렵다. 실제로 유입량과 방류량은 시간의 변화에 따라 불규칙적으로 변하기 때문에 댐 수문 관리 시스템을 제작하기 매우 어렵다.

이러한 복잡한 댐 수문을 효과적으로 관리하기 위해서 이미 몇 가지 방법들이 고안되었다. 그 중에서 Dervis Karaboga에 의해 제안된 방법[1]에서는 직관적으로 성립된 25가지 퍼지 규칙과 이 규칙을 TS 알고리즘(Tabu Search algorithm)[2,3,4]을 이용하여 최적화시킨 15가지 퍼지 규칙을 이용한다. 이 방법은 댐 내부의 수위가 지정된 범위 내에서 유지되도록 하고 시간에 따른 변화가 최대한 부드럽게 나타나도록 한다. 그 결과 TS 알고리즘을 이용한 방법이 직관적으로 성립된 방법보다 효율적이고 신뢰도가 높다는 결과가 나왔고, 유입량이 많다고 해서 수문을 높게 여는 것이 아니라 오랜 시간으로 나누어서 방류하는 방법으로 처리되도록 한다. 하지만 이 방법에서는 적정 수위를 유지하는 것이 아니라 댐의 최저 수위에 항상 수렴하는 특성을 보인다. 그러나 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.

이 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Dervis Karaboga에 의해 제안된 방법에 적정 수위를 유지할 수 있도록 하는 기능을 추가하여 유입량이 적거나 일정한 경우에도 적정 수위를 유지하게끔 하였다. 이를 위해 기존의 정적인 퍼지 기법을 사용하는 것이 아니라 상황 변화에 따라 능동적으로 대처가 가능하도록 하는 동적 퍼지 추론 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_Level, Gate의 표준화 간격으로는 Lake_Level과 Fit_Level은 최저 수위 118m부터 최고 수위 127m이고, Delta_Level은 최저 -1m부터 최고 1m이고, Gate는 최저높이 0m부터 최고 높이 12m로 정하였다.

이를 위하여 표 1과 같이 25가지의 퍼지 추론 규칙이 경험적으로 구성되었고, 각 퍼지 변수에 대한 소속도(membership grade)는 그림 2와 같이 세 종류의 멤버십 함수(membership function)에 의해 표현된다. 하지만 이 논문에서는 기존의 기법과는 달리 적정 수위를 유지하기 위해 수위에 관한 퍼지 멤버십 함수가 적정 수위(Fit_Level)에 따라 변화하는 두 가지 기법을 제안하였다.

표 1. 25가지 퍼지 추론 규칙

H \ dH	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

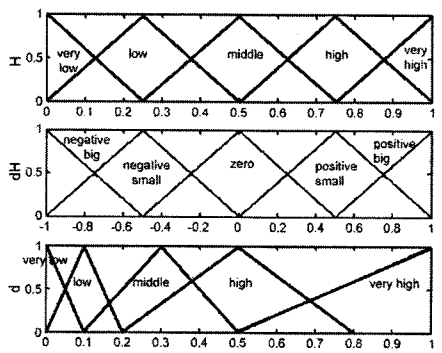

그림 1. 퍼지 멤버십 함수

2.1 첫 번째 제안 기법

첫 번째 제안 기법은 기존 퍼지의 폭을 최대한 유지하면서 퍼지의 단계를 줄이는 방법이다. 이 방법에서 퍼지의 단계를 줄이는 이유는 적정 수위와 최고 수위 사이의 간격이 좁은데 그 사이에 5가지 단계를 모두 넣을 경우 약간의 수위 변화에도 수문의 개폐가 수시로 변하게 되고, 이로 인해 시스템 상으로 처리가 불안할 수 있다고 판단했기 때문이다. 제안한 기법에서 수위에 관한 퍼지 함수를 결정하는 방법은 그림 2와 같다.

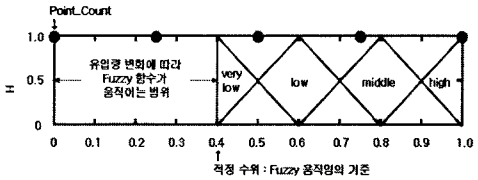

그림 2. 첫 번째 제안 기법의 수위에 관한 퍼지 함수

$$Fit_Level \le Point_Count \quad (1)$$

$$Step = (1 - Fit_Level) / Count \quad (2)$$

우선 적정 수위로부터 최고수위 사이에 들어갈 퍼지 단계의 개수를 결정해야한다. 이를 위해 수식 (1)을 만족할 때마다 Count를 1씩 증가시킨 다음 Count를 수식 (2)에 대입하면 각 단계별 사이의 좌우 간격이 나오게 된다. 그 간격에 따라 수위에 관한 퍼지 함수들이 결정된다.

유입량 변화가 없고 일정한 경우에는 적정 수위(Fit_Level) 값을 그대로 유지하고 유입량에 변화가 발생하는 경우 적정 수위 값을 변경한다. 유입량의 변화는 수식 (3)과 같이 정의된다.

유입량 변화 = 현재 유입량 - 이전 유입량 (3)

수식 (3)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 (1)과 수식(2)를 계속 반복하는 방식으로 처리가 이루어진다.

2.2 두 번째 제안 기법

두 번째 제안 기법은 기존 퍼지 단계를 그대로 유지하면서 함수 폭을 줄이는 방법이다. 이 기법은 첫 번째 제안한 기법 설명에서 언급한 것처럼 실제로 이 방법이 예상했던 문제점이 있는지를 확인해 보고자 제안하였다. 두 번째 제안 기법에서 수위에 관한 퍼지 함수를 결정하는 방법은 그림 3과 같다.

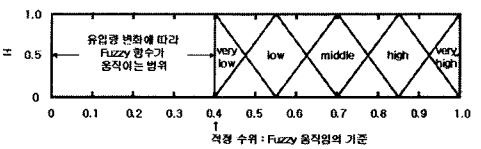

그림 3. 두 번째 제안 기법의 수위에 관한 퍼지 함수

$$Step = (1 - Fit_Level) / 4 \quad (4)$$

이 기법에서는 첫 번째 제안 기법과 같이 수식 (4)에 의해 각 단계별 사이의 좌우 간격이 나오게 되고, 그 간격에 따라 수위에 관한 퍼지 함수들이 결정된다. 이 후 과정은 첫 번째 제안 기법과 동일하다.

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

$$\text{방류량} = Gate \times OutFlow \quad (5)$$

$$\text{변화량} = (\text{유입량} - \text{방류량}) \times 3600 \quad (6)$$

$$\text{변화후 용량} = \text{현재수위에 따른 용량} + \text{변화량} \quad (7)$$

$$Delta_Level = \text{변화량에 의해 변화된 수위} - \text{현재수위} \quad (8)$$

OutFlow는 1m 변화에 따라 $700m^3/s$이고, 수식 (6)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.

표 2. 수위에 따른 저장 용량

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

수문 제어를 위한 최종 출력값을 산출하기 위해서 표 1과 같이 직관적으로 성립된 25가지의 퍼지 규칙들을 사용하였으며 추론 기법으로는 Mamdani의 Max-Min 추론 기법[5]을 이용하였다. 또한 비퍼지화(Defuzzification) 방법으로는 Center of Sum 방법을 사용하였다. 여기서 Center of Sum 방법을 사용한 경우에는 특성 상 한번 수문이 열리면 절대 닫히지 않는 단점이 나타난다. 따라서 이 점을 보안하기 위해 비퍼지화 과정에서 Very Low(VL)에 한해서는 최종 출력값 ($\bar{z}$)에 0을 곱하였다.

III. 실험 결과 및 분석

이 논문에서 제안한 기법들의 성능을 비교하기 위해 Dervis Karaboga가 제안한 기법과 비교하였다. 동일한 유입량의 데이터와 적정 수위(122m)를 가지고 초기 현재 수위를 두 가지 경우로 설정하여 비교 실험하였다. 여기서 '제안1'은 첫 번째 제안 기법을 나타내며, '제안2'는 두 번째 제안 기법을 나타낸다.

첫 번째 시뮬레이션 실험으로서 초기 현재 수위를 낮은 수위로 했을 때를 비교해 보면(그림 4-6), 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 개방하게 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.

또한 두 번째 제안 기법은 첫 번째 제안 기법보다 정해진 정적 수위에 더욱 정확하게 접근을 하고, 방류량과 수문의 변화가 연속적인 곡선의 형태를 나타내는 반면 첫 번째 제안 기법은 유입량이 갑작스럽게 변하는 부분에서 방류량과 수문의 변화가 급격하게 변하며 불연속적인 형태를 나타냈다. 이러한 불연속적인 형태는 수위의 변화에 따라 퍼지의 단계가 늘어나거나 줄어드는 과정에서 발생한 것으로 파악되었다.

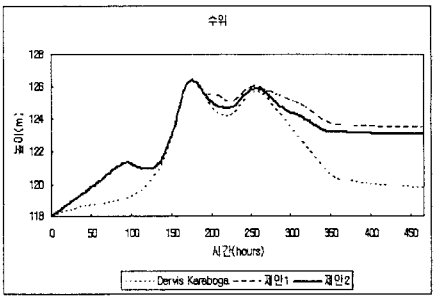

그림 4. 낮은 수위에서 수위 변화

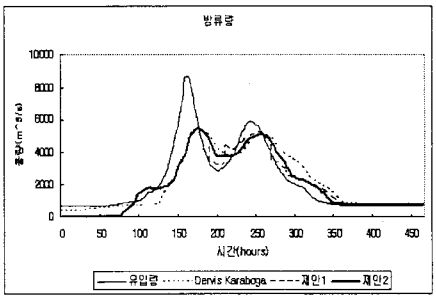

그림 5. 낮은 수위에서 방류량 변화

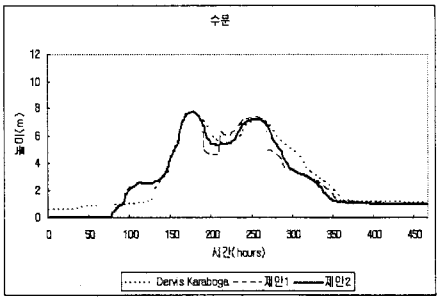

그림 6. 낮은 수위에서 수문 변화

두 번째 시뮬레이션 실험으로서 초기 현재 수위를 적정 수위로 했을 때를 비교해 보면(그림 7-9), Dervis Karaboga가 제안한 방법은 항상 최저 수위에 수렴하기 때문에 수위를 계속 낮추도록 제어하는 반면 이 논문에서 제안한 방법들은 적정 수위를 유지하다가 유입량의 변화가 생길 때 갑작스런 변화에 대비하기 위해 미리 방류를 통해 수위를 낮추는 방식으로 제어한다. 그리고 유입량의 변화가 다시 일정하게 되면 Dervis Karaboga가 제안한 방법에서는 최저 수위로 수렴하지만 제안한 기법들에서는 적정 수위를 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 다만 낮은 수위에서와 같이 두 번째 제안 기법에 적정 수위에 더 정확하게 접근하며 연속적이고 부드러운 곡선 형태를 보였다.

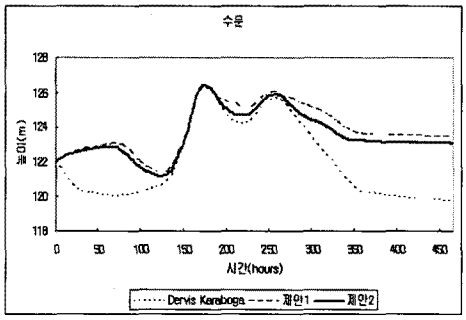

그림 7. 적정 수위에서 수위 변화

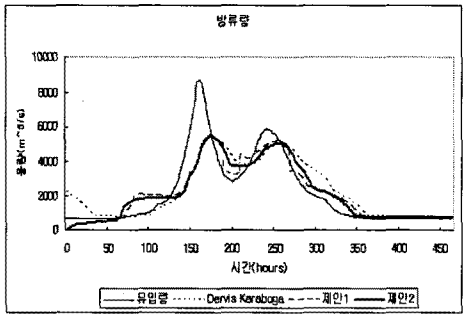

그림 8. 적정 수위에서 방류량 변화

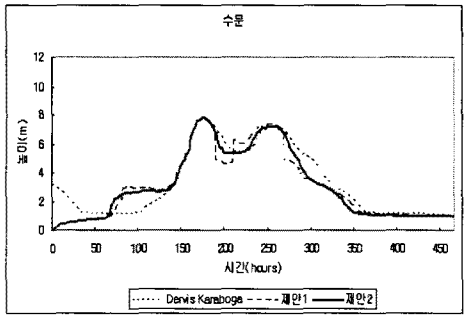

그림 9. 적정 수위에서 수문 변화

결과적으로 이 논문에서 제안한 기법들은 Dervis Karaboga가 제안한 기법과 유사한 결과를 나타내지만 관리자가 원하는 적정 수위를 유지한다는 장점을 가지고 있다. 또한 유입량이 변하는 동안 수위, 방류량 그리고 수문의 변화가 연속적이고 부드러운 곡선의 형태를 나타내는 두 번째 제안 기법이 댐 수문을 제어하기에 보다 효율적임을 알 수 있었다.

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. 따라서 이 논문에서는 기존의 댐 수문 제어 기법에 적정 수위를 유지할 수 있도록 하는 댐 수문 제어 기법을 두 가지 제안하고 그 성능을 시뮬레이션 실험을 통하여 비교, 분석하였다. 그 결과 제안한 기법들이 기존의 기법에서는 처리되지 않았던 적정 수위 유지 기능이 동작함을 확인할 수 있었다. 또한 제안한 두 가지 기법들 중에 두 번째 제안 기법이 보다 부드럽고 정확한 제어가 가능함을 확인할 수 있었다.

그러나 이 논문에서는 하류지역의 범람에 대한 문제가 반영되지 않았기 때문에 하류지역의 범람을 함께 관리할 수 있는 수문 제어 기법에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각한다.

참고문헌

[1] Dervis Karaboga, Aytekin Bagis, Tefaruk Haktanir, "Controlling spillway gates of dams by using fuzzy logic controller with optimum rule number," 2007.

[2] F. Glover, "Tabu search-part 1", ORSA, J. Comput. Vol.3, No.1, pp.190-206, 1989.

[3] F. Glover, "Tabu search-part 2", ORSA, J. Comput. Vol.1, No.2, pp.4-32, 1990.

[4] F. Glover, "A user's guide to tabu search", Ann. Ops. Vol.41 pp.3-28, 1993.

[5] Timothy J. Ross, Fuzzy Logic with Engineering Applications(2nd ed.), Wiley, 2004.